

Optimierung der Methanherzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergieerwertesystem

Th. Amon et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

80/2006

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem

Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon
Universität für Bodenkultur

Wien, April 2006

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Projektleiter:

Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon

Projektmitarbeiter:

Dr. Vitaliy Kryvoruchko

Dr. Katharina Hopfner-Sixt

Dr. Barbara Amon

Marion Ramusch

Dr. Dejan Milovanovic

Dipl.-Ing. Vitomir Bodiroza

Renate Sapik

Jaqueline Zima

Dr. Andrea Machmüller

Institut für Landtechnik, Department Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien

Ao.Univ.Prof. Dr. Werner Zollitsch

Ass.Prof. Dr. Wilhelm Knaus

Institut für Nutztierwissenschaften, Department Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien

Ao.Univ.Prof. Dr. Jürgen K. Friedel

Regina Hrbek

Institut f. Ökologischen Landbau, Department Nachhaltige Agrarsysteme, Universität für Bodenkultur Wien

Univ.Doiz. Dr. Erich Pötsch

Univ.Doiz. Dr. Leonhard Gruber

Dr. Andreas Steinwidder

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für alpenländische Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (HBLFA)

Dipl.-Ing. Erwin Pfundtner

Agentur für Gesundheit- und Ernährungssicherheit (AGES)

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. Helmut Wagentristl

Versuchswirtschaft Großenzersdorf (VWG), Universität für Bodenkultur Wien

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Kurzfassung | 1 |
| Abstract | 2 |
| Zusammenfassung | 3 |
| Summary | 8 |
| 1 Einleitung | 13 |
| 1.1 Relevanz des Projekts im Rahmen der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ ..15 | |
| 2 Stand des Wissens | 18 |
| 2.1 Literatur | 18 |
| 2.2 Eigene Vorarbeiten zum Thema..... | 25 |
| 3 Ziele und Arbeitsschwerpunkte des Projekts | 28 |
| 4 Vorgehensweise, Methoden und Datenbearbeitung | 32 |
| 4.1 Arbeitsablauf und -durchführung der Laborversuche | 32 |
| 4.1.1 Erzeugung und Aufbereitung der Energiepflanzen..... | 32 |
| 4.1.2 Methanenergiewertbestimmung und Analyseverfahren | 34 |
| 4.2 Berechnungsgrundlagen, Methanenergiewertmodell und Statistik | 37 |
| 4.2.1 Berechnungsgrundlagen..... | 37 |
| 4.2.2 Qualitätsbewertung von Energiepflanzen mittels Methanenergiewertmodell..... | 39 |
| 4.2.3 Statistik..... | 43 |
| 4.3 Grundlagen zur Ermittlung nachhaltiger Fruchtfolgesysteme | 43 |
| 4.3.1 Untersuchungsregionen..... | 43 |
| 4.3.2 Datengrundlagen..... | 45 |
| 4.3.3 Betriebstypen | 48 |
| 4.3.4 Fruchtfolgen und Kulturartenauswahl | 51 |
| 4.3.5 Weiterentwicklung der Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau | 58 |
| 5 Ergebnisse | 63 |
| 5.1 Biomasseertrag, Qualität, Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt von Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 1.1. und 1.2.) | 63 |
| 5.1.1 Getreide (Weizen, Roggen, Triticale)..... | 63 |
| 5.1.2 Sonnenblumen | 74 |
| 5.1.3 Wiesen gras | 85 |
| 5.1.4 Mais..... | 93 |
| 5.1.5 Trockengebiet – Region Weinviertel | 100 |
| 5.1.6 Übergangsregion Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 103 |
| 5.1.7 Nördliche Randalpen Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | 107 |
| 5.1.8 Methanhektarerträge vollständiger Fruchtfolgen | 108 |
| 5.1.9 Düngerverwertung..... | 111 |
| 5.1.10 Fazit | 114 |
| 5.2 Vorbehandlung der Energiepflanzen vor dem Einbringen in den Fermenter (Arbeitsschwerpunkt 1.4) | 114 |
| 5.3 Substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter (Arbeitsschwerpunkt 1.5) | 117 |
| 5.4 Sicherer Gärverlauf und hoher Gasertrag durch das Methanenergiewertmodell (Arbeitsschwerpunkt 2.1) | 119 |
| 5.5 Hohe Biogasqualität (Arbeitsschwerpunkt 2.2) | 121 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.6 | Leitfäden für eine optimierte Biogaserzeugung aus Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 2.3) | 126 |
| 5.7 | Leitfäden für eine effiziente Düngung mit dem Gärrückstand vergorener Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 2.4) | 137 |
| 5.8 | Gasreinigung, Gasaufbereitung und Gasnutzung (Arbeitsschwerpunkt 3.1, 3.2 und 3.3) | 141 |
| 5.8.1 | Anforderungen an die Gasreinigung bzw. -aufbereitung entsprechend den einzelnen Nutzungswegen | 142 |
| 5.8.2 | Techniken zur Gasaufbereitung..... | 145 |
| 5.8.3 | Leitfaden zur energetischen Nutzung von Biogas | 156 |
| 6 | Ausblick und Empfehlungen | 167 |
| 7 | Verzeichnisse | 171 |
| 7.1 | Literaturverzeichnis | 171 |
| 7.2 | Abbildungsverzeichnis | 182 |
| 7.3 | Tabellenverzeichnis | 184 |
| 7.4 | Abkürzungsverzeichnis | 189 |
| 8 | Anhang | 192 |

Kurzfassung

Das vorliegende Projekt dient der Förderung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. Es wurden die Energiepflanzen Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen, Triticale, Roggen und Mais untersucht. Alle Energiepflanzen wurden im Verlauf der Vegetation zu vier bis sechs verschiedenen Zeitpunkten geerntet. Es wurden Ertragsmessungen, Inhaltsstoffanalysen und Laboruntersuchungen zur Bestimmung der spezifischen Methanausbeute mit Hilfe von Eudiometer-Messzellen durchgeführt. Für alle untersuchten Energiepflanzen wurden der Methanhektarertrag und der optimale Erntezeitpunkt ermittelt.

Von den im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzenarten zeigte der Mais die höchsten Biomasse- und Methanerträge je Hektar. Mit Sonnenblumen wurden rund 30 % des Methanhektarertrages von Mais erzielt und mit Getreide oder intensiv bewirtschafteten Wiesengras ca. 26,5 %. Innerhalb der untersuchten Energiepflanzenarten zeigten sich in Hinblick auf den Methanhektarertrag Variationen von 6 bis 38 %, abhängig von der Sorte, dem Anbaustandort, der Bewirtschaftungsintensität oder dem Erntezeitpunkt.

Die Wirkung von Vorbehandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute von Energiepflanzen wurde untersucht. Es zeigte sich, dass mit Ausnahme der Tonminerale, die die spezifische Methanausbeute aller Energiepflanzen steigerten, die Vorbehandlungsmaßnahmen eine unterschiedliche Wirkung in den verschiedenen Energiepflanzen besaßen.

Die im vorliegenden Projekt ermittelten optimalen hydraulischen Verweilzeiten lagen zwischen 20 (Getreideganzpflanzensilagen) und 42 Tagen (Sonnenblumensilagen). Diese Ergebnisse müssen in weiterführenden Untersuchungen mit dynamischen Systemen verifiziert werden.

Um dauerhaft Erfolg zu bringen, muss der Energiepflanzenanbau nach den Grundsätzen nachhaltiger Fruchtfolgen gestaltet sein. Im vorliegenden Projekt wurden daher standortangepasste biologische und konventionelle Modellfruchtfolgen unter der Einbeziehung von Möglichkeiten des Energiepflanzenanbaus als Haupt- und Zwischenfrüchte entwickelt.

Mit den Daten aus dem vorliegenden Projekt konnte das Methanenergiewertmodell für Mais soweit fortgeführt werden, dass es nun in der Praxis eingesetzt werden kann. Die Datengrundlage für die Schätzung des Methanenergiewerts von Getreide, Sonnenblumen und Wiesengras ist aber noch zu gering und erfordert weitere Untersuchungen.

Der Einfluss des Eiweiß:Energie-Verhältnisses in Gärgutmischungen von Energiepflanzen auf das spezifische Methanbildungsvermögen und auf die Biogasqualität wurde mit Hilfe von eiweißreicher Kleegrassilage und energiereicher Maissilage untersucht.

Leitfäden für (a) eine optimierte Biogaserzeugung aus Energiepflanzen, (b) eine effiziente Düngung mit Gärrückstand vergorener Energiepflanzen sowie (c) zur verschiedenen Nutzung des Biogases werden gegeben.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts zeigen auf, dass die Biogaspotenziale von Energiepflanzen größer sind als bislang angenommen.

Abstract

This project serves to promote biogas production from energy plants. The energy plants: sunflowers, meadow grass, wheat, triticale, rye and maize were investigated. All energy plants were harvested in the course of the vegetation period at four to six different times. At each harvest, yield measurements were carried out, as well as biomass sampled for silaging and the subsequent ingredient analyses. Following, laboratory investigations for the determination of the specific methane yield were carried out with the help of Eudiometer-instrumentation. The methane hectare yield and the optimal harvest times were determined for all of the investigated energy plants.

Of all the energy plant species investigated in this project, maize showed the highest biomass yields and methane yields per hectare. Sunflowers achieved approximately 30 % of the methane hectare yield obtained by maize, cereals or intensive farmed meadow grass on average 26.5 %. Variations of 6 to 38 % in methane hectare yield appeared within the examined energy plant species depending on the variety, the place of cultivation, the management intensity or the harvest time. The effect of pretreatment measures (acidifying, heat treatment, microwave irradiation and addition of clay minerals) on the specific methane yield of energy plants was examined. With the exception of the clay minerals which increased the specific methane yield for all energy plants, it appeared that the pretreatment measures had a different effect on the different energy plants.

The optimal hydraulic retention times, determined in this project, lay between 20 days (cereal silage from whole plant) and 42 days (sunflower silage). Besides the energy plant type, the hydraulic retention time also appears to be influenced by the harvest year and the assigned pretreatment measure. These results must be verified in further investigations with dynamic systems.

In order to achieve long-term success, the cultivation of energy plants must be organized using sustainable crop rotation principles. Locally adapted biological and conventional crop rotations were developed in this project with the prospects of energy plant cultivations as main and intermediate crops.

With the data from the project, the Methane Energy Value Model for maize could be continued so far that it can now be used in practice. The base data for the equations for the estimation of the methane energy value of cereals, sunflowers and meadow grass is however still too small and requires further investigations.

The influence of the protein:energy ratio of mixtures of energy plants on the specific methane yield and on the biogas quality was examined with the help of protein-rich clover grass silage and energy-rich maize silage.

Guidelines for (a) optimized biogas production from energy plants, (b) efficient fertilization with fermentation residues of fermented energy plants as well as (c) different uses of biogas are given.

The results of this project show that the potentials of biogas from energy plants are larger than have been assumed so far.

Zusammenfassung

Die Biogaserzeugung ist eine Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen energetischen und stofflichen Nutzung von agrarischer Biomasse, die den Umwelt- und Klimaschutz deutlich positiv beeinflusst. Nach den vorliegenden neuen Kalkulationen zu integrierten Biogaserzeugungssystemen ergibt sich ein jährliches Gesamtpotenzial von 4,8 Mio. t ROE bzw. 4,8 Mrd. m³ Methan. Das bedeutet, wenn die Potenziale der Biogaserzeugung genutzt werden würden, wäre es möglich, in Österreich pro Jahr mehr als 16 Mio. t CO₂-Emissionen einzusparen. Dies entspricht exakt dem derzeitigen Reduktionsbedarf Österreichs, um das Kyoto-Ziel zu erreichen. Um dieses Potenzial in der Biogaserzeugung umsetzen zu können, müssten zukünftig aber ca. 70 % der Methanproduktion aus der Vergärung von Energiepflanzen stammen. Das vorliegende Projekt dient der Förderung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen und hatte die folgenden Ziele und Arbeitsschwerpunkte:

Ziel 1: Erzeugung von Energiepflanzen für einen hohen Methanertrag

- Arbeitsschwerpunkt 1.1: Qualität von Energiepflanzen
- Arbeitsschwerpunkt 1.2: Methanhektarertrag von Energiepflanzenarten und -sorten
- Arbeitsschwerpunkt 1.3: Nachhaltige Fruchtfolgesysteme für den Energiepflanzenanbau
- Arbeitsschwerpunkt 1.4: Vorbehandlung der Energiepflanzen
- Arbeitsschwerpunkt 1.5: Substratspezifisch optimale hydraulische Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter

Ziel 2: Biogaserzeugung mit hoher Effizienz und Qualität

- Arbeitsschwerpunkt 2.1: Sicherer Gärverlauf und hoher Gasertrag durch das MEWM
- Arbeitsschwerpunkt 2.2: Hohe Biogasqualität
- Arbeitsschwerpunkt 2.3: Leitfäden für eine optimierte Biogaserzeugung aus Energiepflanzen
- Arbeitsschwerpunkt 2.4: Leitfäden für eine effiziente Düngung mit dem Gärrückstand vergorener Energiepflanzen

Ziel 3: Optimierte Biogasnutzung

- Arbeitsschwerpunkt 3.1: Gasreinigung und -aufbereitung
- Arbeitsschwerpunkt 3.2: Gasnutzung
- Arbeitsschwerpunkt 3.3: Leitfäden für verschiedene Nutzungen des Biogases

Energiepflanzenuntersuchungen

Auf insgesamt 60 ha Versuchsfläche wurden im vorliegenden Projekt die zu untersuchenden Energiepflanzen Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen, Triticale, Roggen und Mais erzeugt. Die Wahl der Anbaustandorte und die Auswahl der Energiepflanzen bilden repräsentative Anbau- und Ertragsverhältnisse der verschiedenen Regionen und Standorträume in Österreich ab. Von jeder Fruchtart wurden mindestens zwei marktgängige Sorten verwendet. Die Ernten der verschiedenen Energiepflanzen erfolgten im Verlauf der Vegetation zu jeweils vier bis sechs verschiedenen, aufeinander folgenden Erntezeitpunkten, beginnend mit früher Vegetationsentwicklung bis Vollreife der Pflanzen. Zu jedem Erntezeitpunkt wurden Ertragsmessungen durchgeführt sowie Biomasseproben zur Silagenbereitung und späteren Inhaltsstoffanalyse gewonnen.

Die nachfolgenden Laboruntersuchungen zum anaeroben Stoff- und Energiewechsel wurden hauptsächlich mit silierter Biomasse durchgeführt, da die Silierung das Standardkonservierungsverfahren für die Biogaserzeugung ist. Die spezifische Methanausbeute wurde unter kontrollierten Gärbedingungen mit Hilfe von Eudiometer-Messzellen nach DIN-Norm 38414 gemessen. Aufgrund der im Labor gewonnenen Daten konnten für alle untersuchten Energiepflanzen der Methanhektarertrag und der optimale Erntezeitpunkt bestimmt werden.

Von den im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzenarten zeigte Mais die höchsten Biomasseerträge je Hektar. Aufgrund einer hohen spezifischen Methanausbeute wurden mit der Energiepflanze Mais auch die höchsten Methanhektarerträge erzielt. Mit Sonnenblumen wurden rund 30 % des Methanhektarertrages von Mais erzielt und mit Getreide oder intensiv bewirtschaftetem Wiesengras ca. 26,5 %. Innerhalb der untersuchten Energiepflanzenarten zeigte sich in Hinblick auf die Variation des Methanhektarertrages, dass beim Mais allein durch die Wahl der Sorte der Methanhektarertrag um 29 % schwankte. Im Getreide variierte der maximale Methanhektarertrag abhängig vom Standort und der Getreideart und -sorte um 26 %. Die untersuchten Sonnenblumensorten variierten im Methanhektarertrag um 38 % und im Wiesengras gab es Variationen im Methanhektarertrag abhängig vom Erntezeitpunkt und der Bewirtschaftungsintensität von 21 bis 34 %. Das bedeutet, dass nicht nur durch die Wahl der Energiepflanzenart, sondern auch durch die Wahl der Sorte, des Anbaustandortes, der Bewirtschaftungsintensität und des Erntezeitpunkts die bestehenden Potenziale im Energiepflanzenbau bestmöglichst ausgenutzt werden können.

Der optimale Erntezeitpunkt ist erreicht, wenn die Energiepflanzen ihr maximales Bildungsvermögen für Methan und Biomasse erreichen und gut silierfähig sind. Aus dem vorliegenden Maissortenvergleich ließen sich folgende Aussagen in Bezug auf den optimalen Erntezeitpunkt ableiten: Sorte Baxter: Ernte im Vegetationsstadium „Mitte Teigreife“; Sorte Wexxil: Ernte im Vegetationsstadium „Ende Teigreife“; und Sorten DK532, Cecilia, Alisun und Doge: optimaler Erntezeitpunkt wurde unter österreichischen Bedingungen nicht erreicht.

Für die im vorliegenden Projekt untersuchten Getreidesorten ergaben sich die folgenden optimalen Erntezeitpunkte: Weizensorte Capo und Roggensorte Beskud: Ernte im Vegetationsstadium „Milchreife der Körner“; und Weizensorte Levendis und Triticalesorten Tremplin und Talentro: Ernte im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“. Da der optimale Erntezeitpunkt von Capo und Beskud noch vor der „Teigreife der Körner“ liegt, eignen sich diese beiden Sorten auch zum Anbau als Vorfrucht. Zum optimalen Erntezeitpunkt der Getreideganzpflanzen würde mit den Silagen der Roggensorte Beskud die höchsten Methanhektarerträge erzielt werden.

Für die beiden im vorliegenden Projekt untersuchten Sonnenblumensorten wurden folgende optimale Erntezeitpunkte ermittelt: Sorte PR 63A82: Ernte im Vegetationsstadium „Samen sind schwarz“ und Sorte PR 64H41 Ernte im Vegetationsstadium „Vollreife“. Aufgrund ihres hohen Methanhektarertrages eignet sich die Sonnenblumensorte PR 63A82 besonders zum Anbau als Energiepflanze. Inwieweit die Methanertragsunterschiede der Sonnenblumensorten auf das unterschiedliche Fettsäuremuster zurückzuführen sind, müsste in weiterführenden Untersuchungen abgeklärt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen zum Wiesengras konnten in Hinblick auf einen optimalen Erntezeitpunkt Folgendes abgeleitet werden: (a) ein verzögerter erster Schnitt (ca. zwei Wochen) kann den gesamten Methanhektarertrag bei mehrschnittigen Systemen erhöhen und (b) die Aufwüchse sollten im Zeitraum Ährenschieben bis Blüte geschnitten werden. In Bezug auf

Wiesengras muss in weiterer Folge der Faktor „Botanische Bestandeszusammensetzung“ genauer analysiert werden. Dieser spielt insbesondere im Bereich Dauergrünland eine große Rolle und beeinflusst ganz maßgeblich den Gehalt an vergärbaren Nährstoffen.

Im vorliegenden Projekt wurde auch die Wirkung von **Vorbehandlungsmaßnahmen** auf die spezifische Methanausbeute von Energiepflanzen untersucht. Für diese Untersuchung wurden frische Getreideganzpflanzen (Triticale und Weizen), kleereiche Wiesengrassilage und Sonnenblumensilage verwendet. An allen Energiepflanzen wurden die gleichen Vorbehandlungsmaßnahmen getestet: (a) Keine Behandlung, (b) Ansäuerung, (c) Hitzebehandlung, (d) Mikrowellenbestrahlung und (e) Zugabe von Tonmineralen. Es zeigte sich, dass die verschiedenen Vorbehandlungsmaßnahmen in den verschiedenen Energiepflanzen zum Teil eine unterschiedliche Wirkung besaßen. Die Vorbehandlungsmaßnahmen Dampf, Mikrowellen und Säure zielten darauf ab, einen Voraufschluss der Rohfaserfraktion zu bewirken und somit die Verfügbarkeit der Nährstoffe im anaeroben Abbau zu verbessern. Die vorliegenden Ergebnisse deuten an, dass diese Wirkung nur bei den Energiepflanzen Wiesengras und Sonnenblumen zu erreichen ist, nicht aber für das Getreide. Es bleibt aber zu testen, ob es einen Einfluss auf die Wirkung dieser Behandlungsmaßnahmen gehabt hat, dass das Wiesengras und die Sonnenblumen als Silage eingesetzt wurden und das Getreide im frischen Zustand. Zusätzlich könnte auch das Vegetationsstadium, in dem die Gärrohstoffe geerntet wurden, das Ausmaß der Wirkung der Vorbehandlungsmaßnahmen beeinflussen, da sich der Gehalt und die Zusammensetzung der Rohfaser im Verlauf der Vegetation verändert. Durch den Zusatz an Tonmineralen (IPUS meth-max[®]) wurde die spezifische Methanausbeute aller Energiepflanzen gesteigert.

Die substratspezifische **optimale hydraulische Verweilzeit** ist ein wichtiger Kennwert, um Biogasfermenter korrekt dimensionieren zu können. Die erforderliche hydraulische Verweilzeit für die verschiedenen Energiepflanzen wurde aus der zeitlichen Entwicklung der kumulierten spezifischen Methanausbeute in den Laborversuchen abgeleitet. Die im vorliegenden Projekt ermittelten optimalen hydraulischen Verweilzeiten lagen zwischen 20 Tagen (Getreideganzpflanzensilagen) und 42 Tagen (Sonnenblumensilagen). Es zeigte sich ein Einfluss der Energiepflanzenart und des Erntejahres, aber auch der Vorbehandlungsmaßnahme auf die optimale hydraulische Verweilzeit. Keinen Einfluss scheint es zu haben, ob frische oder silierte Biomasse vergärt wird. Einige dieser Ergebnisse, speziell der Einfluss der Vorbehandlungen, scheinen nicht erklärbar und gegenläufig zu dem, was erwartet wurde. Die optimale hydraulische Verweilzeit ist aber auch abhängig von der Raumbelastung im Fermenter. Die im vorliegenden Projekt für die unterschiedlichen Energiepflanzen gefundenen optimalen hydraulischen Verweilzeiten müssen daher als erste Anhaltspunkte angesehen werden, da sie in einem statischen System (Batchfermenter) ermittelt wurden. In weiterführenden Untersuchungen mit dynamischen Systemen (Durchflusssystemen) müssen diese Ergebnisse noch verifiziert werden.

Nachhaltige Fruchtfolgesysteme

Um dauerhaft Erfolg zu bringen, muss der Energiepflanzenanbau nach den Grundsätzen nachhaltiger Fruchtfolgen gestaltet sein, d.h. einseitige Fruchtfolgen müssen vermieden werden. Nur in standortangepassten und ökologisch ausgewogenen Fruchtfolgesystemen ist die Erzeugung von Energiepflanzen sinnvoll. Im vorliegenden Projekt wurden daher erste Vorschläge für standortangepasste biologische und konventionelle Fruchtfolgesysteme unter der Einbeziehung von Möglichkeiten des Energiepflanzenanbaues als Haupt- und Zwischenfrüchte entwi-

ckelt. Es wurden Untersuchungsregionen gewählt, die weite Bereiche Österreichs repräsentieren. Um möglichst einen hohen Anteil an potenziell anbaubaren Kulturarten Österreichs einzu beziehen, wurden Regionen aus einem Trockengebiet, aus einem Übergangsbereich und aus den nördlichen Randalpen ausgewählt. Aufbauend auf den gesammelten Daten wurden drei verschiedene Kategorien von Modellfruchtfolgen formuliert:

1. Regionstypische Modellfruchtfolgen
2. Fruchtfolgen unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen
3. Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau mit maximalen Methanhektarerträgen

Für alle Untersuchungsgebiete sowie Betriebsarten (biologisch und konventionell) wurden entlang der Fruchtfolgen für die ausgewählten Kulturarten Leistungsprofile mittels Naturalertrag, Deckungsbeitrag und Methangasertrag beschrieben. Die erzielten Ergebnisse sind erste Ansätze. In weiterer Folge sollen Landbausysteme entwickelt werden, in denen die Biogaserzeugung als Schlüsseltechnologie der Zukunft systemimmanenter Bestandteil ist.

Biogaserzeugung mit hoher Effizienz und Qualität

Mit dem **Methanenergiewertmodell (MEWM)** wird der Einfluss einzelner Pflanzeninhaltsstoffe (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) auf das Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen bei der Biogaserzeugung bestimmt. Das spezifische Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen steht im direkten Zusammenhang zur Inhaltsstoffzusammensetzung der Energiepflanzen. Es können dadurch Gleichungen zur Schätzung des Methanenergiewerts (MEW) einzelner Energiepflanzen kalkuliert werden. Mit dem vorliegenden Projekt sollte das Methanenergiewertmodell für Mais weiterentwickelt und weitere wichtige Energiepflanzen (Sonnenblumen, Weizen, Triticale, Roggen und Wiesengras) neu integriert werden. Auf der Basis von 95 Datensätzen ist das Methanenergiemodell für Mais nun soweit, dass es dazu verwendet werden kann, den Methanenergiewert von Mais anhand der Inhaltsstoffe zu schätzen. Die Methanenergiewertmodelle für Getreide, Sonnenblumen und Wiesengras basieren auf 20, 15 bzw. 40 Datensätzen, nicht alle Regressionskoeffizienten waren signifikant, d.h. der derzeitige Datenumfang ist noch zu gering, so dass für diese Energiepflanzen noch weiterführende, detaillierte Untersuchungen erforderlich sind.

Der Einfluss des Eiweiß:Energie-Verhältnisses in Gärgutmischungen von Energiepflanzen auf das spezifische Methanbildungsvermögen und auf die **Biogasqualität** wurde mit Hilfe von junger, eiweißreicher Kleegrassilage und energiereicher Maissilage untersucht. Um unterschiedliche Eiweiß:Energie-Verhältnisse testen zu können, wurde die Kleegrassilage mit der Maissilage in 11 Stufen kombiniert. Je höher der Anteil an Maissilage in der Mischung lag, desto höher war der spezifische Methanertrag. Doch mit keiner der Mischungen wurde ein Methanertrag vergleichbar mit der Variante 100 % Maissilage erreicht. Aus den vorliegenden Daten lässt sich daher ableiten, dass bei der Vergärung von Mischungen aus Mais- und Kleegrassilage sich der spezifische Methanertrag additiv verhält. Die vorliegenden Daten zeigen ebenfalls deutlich auf, dass das Eiweiß:Energie-Verhältnis im Gärgut den Gehalt an Methan, Schwefelwasserstoff und Ammoniak im Biogas, und damit die Biogasqualität, beeinflusst. Je höher der Eiweißgehalt bzw. der Anteil an Kleegrassilage in der Gärgutmischung, desto niedriger lag der Methangehalt im produzierten Biogas und desto höher der Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt.

Der Biokatalysator IPUS meth-max[®] ist in der Lage, durch nanoporöse Alumosilikate-Mineralien reversible Stoffe wie Ammonium zu binden. Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte demonstriert werden, dass eine Zulage von IPUS meth-max[®] zu den Energiepflanzen Triticale, Weizen, Wiesen gras und Sonnenblumen eine Reduktion des Ammoniakgehaltes im Biogas bewirkte. Auf den Gehalt an Methan und Schwefelwasserstoff im produzierten Biogas zeigte die Zulage an IPUS meth-max[®] keine einheitliche Wirkung.

Die im Biogasprozess entstehenden **Fermentationsrückstände** stellen für den Betrieb einen wertvollen organischen Dünger dar und helfen, den Einsatz von Mineraldünger zu senken. Die Fermentationsrückstände aus Biogasanlagen sind sehr gut wirksame Mehrnährstoffdünger, die aufgrund eines engeren C:N-Verhältnisses und einem höheren Anteil an leicht löslichem, pflanzenverfügbarem Stickstoff eine verbesserte direkte Pflanzenverfügbarkeit und damit einen höheren Düngewert als unfermentierte Wirtschaftsdünger besitzen. Durch die Düngung der Fermentationsrückstände gelangen die Nährstoffe wieder auf die Anbauflächen zurück (Kreislaufwirtschaft der Stoffe). Eine Düngeempfehlung kann auf Basis der Abfuhr an Nährstoffen durch das Erntegut abgeleitet werden. Anzustreben ist eine ausgeglichene Nährstoffbilanz.

Optimierte Biogasnutzung

Das in Biogasanlagen produzierte Biogas ist wasserdampfgesättigt und beinhaltet neben den Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid auch in geringen Mengen andere Stoffwechselprodukte aus dem anaeroben Abbauprozess. Diese Begleitkomponenten können je nach Nutzung des Biogases für das Verwertungssystem schädlich sein, die Nutzungseffizienz vermindern, zu unzulässigen Schadgasemissionen führen oder eine Vermischung mit anderen gasförmigen Energieträgern nicht zulassen. Die verschiedenen Gasnutzungswege stellen unterschiedliche Ansprüche an die Gasqualität. Welche Aufbereitungsschritte für die einzelnen Nutzungswege notwendig sind, wird im Detail dargestellt. Techniken zur Gasaufbereitung (Entwässerung, Entschwefelung und Methananreicherung) werden beschrieben und diskutiert. Abhängig vom Nutzungsweg wird die energetische Umwandlung von Biogas in einem Leitfaden erläutert.

Es kann das Fazit gezogen werden, dass die Biogaspotenziale von Energiepflanzen sehr groß sind und sich mit Energiepflanzen neue Möglichkeiten der Biomasseerzeugung in vielfältigen Fruchtfolgesystemen, der Cofermentation mit Wirtschaftsdüngern und hochwertigen organischen Stoffen aus den der Landwirtschaft vor- und nachgelagerten Bereichen bieten. Zu welchem Anteil und in welchem Zeitraum diese Potenziale aber tatsächlich in die Praxis umgesetzt werden können, hängt auch wesentlich von den herrschenden politischen Rahmenbedingungen ab.

Summary

Biogas production is a key technology for sustainable energy and material use of agrarian biomass, which positively influences environment and climate protection. The present, new calculations of integrated biogas production systems show an annual total potential of 4.8 million t ROE or 4.8 billion m³ methane. That means if the potentials of biogas production would be used, in Austria more than 16 million t CO₂ emissions could be saved per year. This equals exactly the current requirements of reduction in Austria to reach the Kyoto target. In order to be able to reach this potential in biogas production, in the future approximately 70 % of methane production would have to come from the fermentation of energy plants. Energy plants from fields and grasslands therefore possess a high value for a trend-setting energy production from renewable raw materials.

This project serves to promote biogas production from energy plants and had the following goals and working focal points:

Goal 1: Production of energy plants for a high methane yield

- Working focal point 1.1: Quality of energy plants
- Working focal point 1.2: Methane hectare yield of energy plant species and varieties
- Working focal point 1.3: Sustainable crop rotation systems for energy plant cultivation
- Working focal point 1.4: Pretreatment of the energy plants before bringing them into the fermenter
- Working focal point 1.5: Substrate specific optimal hydraulic retention time of the energy plants in the fermenter

Goal 2: Biogas production with high efficiency and quality

- Working focal point 2.1: Reliable fermenting process and high gas yield through the Methane Energy Value Model (MEVM)
- Working focal point 2.2: High biogas quality
- Working focal point 2.3: Guidelines for optimized biogas production from energy plants
- Working focal point 2.4: Guidelines for an efficient fertilization with the fermentation residues of fermented energy plants

Goal 3: Optimize biogas utilization

- Working focal point 3.1: Gas cleaning and processing
- Working focal point 3.2: Gas utilization
- Working focal point 3.3: Guidelines for different uses of biogas

Energy plant investigations

On altogether 60 hectares of study area, the investigated energy plants: sunflowers, meadow grass, wheat, triticale, rye and maize were produced. The choice of cultivation locations and the selection of the energy plants were representative of cultivation and yield conditions of the different regions and locations in Austria. Of each crop type, at least two marketable varieties were used. The harvests of the different energy plants took place in the course of the vegetation period, each with four to six different sequential harvest times, starting at the early vegetation development until full maturity of the plants. At each harvest, yield measurements were carried out, as well as biomass sampled for silaging and the subsequent ingredient analyses.

The following laboratory investigations of the anaerobic material and energy conversion were carried out mainly with silage biomass because silaging is the standard preservation procedure for biogas production. The specific methane yield was measured under controlled fermenting conditions with the help of Eudiometer-instrumentation according to DIN-standard 38414. Based on the data acquired in the laboratory, the methane hectare yield and the optimal harvest time could be determined for all of the examined energy plants.

Of all the energy plant species investigated in this project, maize showed the highest biomass yields per hectare. Based on a high specific methane yield, the energy plant maize also obtained the highest methane hectare yield. Sunflowers achieved approximately 30 % of the methane hectare yield obtained by maize, cereals or intensive farmed meadow grass on average 26.5 %. Within the examined energy plant species, a variation with regards to methane hectare yield was observed; in maize, for example, through the choice of the variety the methane hectare yield varied around 29 %. In cereals, the maximum methane hectare yield varied around 6 % depending on location and the cereal variety. The examined sunflower varieties varied around 38 % in the methane hectare yield. Meadow grass varied in methane hectare by 21–34 % depending on the harvest time and the management intensity. That means that not only by the choice of the energy plant species but also by the choice of the variety, the cultivation location, the management intensity and the harvest time the existing potentials in energy crop farming can be optimized.

The optimal harvest time is reached when the energy plants reach their maximum development capacity for methane and biomass and are ready for silaging. From the presented maize variety comparison, the following statements could be deduced regarding the optimal harvest time: variety Baxter: harvest in the vegetation stage “middle wax ripeness“; variety Wexsil: harvest in the vegetation stage “end wax ripeness“; and varieties DK532, Cecilia, Alisun and Doge: optimal harvest time was not reached under Austrian conditions.

For the cereal varieties examined in this project, the following, optimal harvest times were identified: wheat variety Capo and rye variety Beskud: harvest in the vegetation stage “milk ripeness of the grains“; and wheat variety Levendis and triticale varieties Tremplin and Talentro: harvest in the vegetation stage “wax ripeness of the grains“. Since the optimal harvest time of Capo and Beskud lies before the “wax ripeness of the grains“, these two varieties are suitable to cultivation as a preliminary crop. At the optimal harvest time of the entire cereal plants, silage of the rye variety Beskud achieved the highest methane hectare yields.

For the two sunflower varieties examined in this project, the following optimal harvest times were determined: variety PR 63A82: harvest in the vegetation stage “seeds are black“ and variety PR 64H41: harvest in the vegetation stage “fully ripe“. Based on its high methane hectare yield, the sunflower variety PR 63A82 is particularly suitable for cultivation as an energy plant. To what extent the methane yield differences of the sunflower varieties are a result of the differences in their fatty acid composition would have to be clarified in further investigations.

From the present results, with regard to the optimal harvest time of meadow grass the following was derived: (a) a delayed first cut (approx. two weeks) can increase the total methane hectare yield in multi-cut systems and (b) the growth should be cut in the period between heading and flowering. Regarding meadow grass, the “botanical composition“ must be analyzed more exactly in further investigations. This plays a significant role on continuous grassland and influences considerably the concentration of fermentable nutrients.

In this project, the effect of pretreatment measures on the specific methane yield of energy plants was examined. For this investigation, fresh cereal plants (triticale and wheat), clover-rich meadow grass silage and sunflower silage were used. The same pretreatment measures were tested on all the energy plants: (a) no treatment, (b) acidifying, (c) heat treatment, (d) microwave irradiation and (e) addition of clay minerals.

It was shown that the different pretreatment measures in the different energy plants had partially different effects. The pretreatment measures of steam, microwaves and acid aimed to cause pre-pulping of the crude fiber fraction and thus improve the availability of nutrients in anaerobic digestion. The presented results suggest that this effect can be attained only in the energy plants of meadow grass and sunflowers, not however for cereals. It remains to be seen however, whether there is an influence on the effect of these treatment measures, provided that the meadow grass and the sunflowers were used as silage and the cereals in a fresh form. In addition, the vegetation stage in which the fermenting raw materials were harvested could also have influenced the degree of the effect of the pretreatment measures, as the content and the composition of the crude fiber changes in the course of vegetation growth. With the addition of clay minerals (IPUS meth-max[®]), the specific methane yield of all energy plants was increased.

The substrate specific optimal hydraulic retention time is an important characteristic value, in order to correctly dimension biogas fermenters. The required hydraulic retention time for the different energy plants was derived from the temporal formation of cumulated specific methane yield in the laboratory tests. The optimal hydraulic retention times, determined in this project, lay between 20 days (cereal silage from whole plant) and 42 days (sunflower silage). Besides the energy plant species, hydraulic retention time also appears to be influenced by the harvest year and the assigned pretreatment measure. It seems there is no difference whether fresh or silage biomass is fermented. Some of these results, particularly the influence of the pretreatments, do not seem explainable and are contrary to what was expected. The optimal hydraulic retention time however, is also dependent on the capacity of the fermenter. The optimal hydraulic retention times found in this project for the different energy plants must be regarded as a first reference point, as they were determined in a static system (batch fermenter). In further investigations with dynamic systems (flow systems), these results must still be verified.

Sustainable crop rotation systems

In order to achieve long-term success, the cultivation of energy plants must be organized using sustainable crop rotation principles, i.e. single crop rotations must be avoided. Only in locally adapted and ecologically balanced crop rotation systems the production of energy plants is sensible. In this project, first proposals for locally adapted biological and conventional crop rotations were developed with the prospects of energy plant cultivations as main and intermediate crops. Test sites were selected which represent most areas of Austria. In order to include a high portion of potentially productive cultivation species in Austria, areas from a dry region, a transition zone, and from the northern edge of the Alps were selected. Building on the collected data, three different categories of model crop rotation were formulated:

1. Region-typical model crop rotations
2. Crop rotations for the cultivation of energy plants with consideration of ethical and economical conditions
3. Crop rotations for the cultivation of energy plants with maximum methane hectare yields

For all investigation areas as well as operating methods (biological and conventional), achievement profiles were described for the crop rotations of the selected culture species by means of production in kind, contribution margin and methane gas yield. The obtained results are first beginnings. In further progression, cropping systems should be developed in which biogas production as a key technology of the future will be an immanent part of the systems.

Biogas production with high efficiency and quality

With the Methane Energy Value Model (MEVM), the influence of specific plant ingredients (crude protein, crude fat, crude fiber and N-free extract) on the methane yield from energy plants in biogas production is determined. The specific methane yield of energy plants is directly related to the ingredient composition of the energy plants. Thereby, equations can be calculated for the estimation of the Methane Energy Value (MEV) of individual energy plants. With this present project, the MEVM for maize should be further developed and additional important energy plants (sunflowers, wheat, triticale, rye and meadow grass) be integrated. On the basis of 95 data records, the MEVM for maize is now ready that it can be used to estimate the MEV of maize based on the ingredients. The MEVMs for cereals, sunflowers and meadow grass are currently based on 20, 15 and 40 data records respectively; however, not all regression coefficients are significant, i.e. the present data set is still too small, so that for these energy plants further detailed investigations are required.

The influence of the protein:energy ratio of mixtures of energy plants on the specific methane yield and on the biogas quality was examined with the help of young, protein-rich clover grass silage and energy-rich maize silage. To test different protein:energy ratios, the clover grass silage was combined with the maize silage in 11 stages. The results showed that a higher portion of maize silage in the mixture resulted in a higher specific methane yield. Yet none of the mixtures could reach a methane yield comparable to the sample of 100 % maize silage. From this data it can therefore be deduced that in the fermentation of mixtures of maize silage and clover grass silage, the specific methane yield is additive. The presented data also show clearly that the protein:energy ratio in the fermenting mixture influences the concentration of methane, hydrogen sulfide and ammonia in the biogas, and thereby the biogas quality. The higher the protein content and/or the portion of clover grass silage in the fermenting mixture, the lower the methane content in the produced biogas and the higher the hydrogen sulfide and ammonia content.

The biocatalyst IPUS meth-max[®], via nanoporous aluminosilicate minerals, is able to bind reversible materials such as ammonium. It was demonstrated with the present experiments, that the addition of IPUS meth-max[®] to the energy plants: triticale, wheat, meadow grass and sunflowers caused a reduction of the ammonia content in the biogas. The addition of IPUS meth-max[®] showed no consistent effect on the concentration of methane and hydrogen sulfide in the produced biogas.

The fermentation residues produced from the biogas process represent a valuable organic fertilizer and help to reduce the use of mineral fertilizers. The fermentation residues from biogas facilities are very effective multi-nutrient fertilizers and possess a higher fertilization value than unfermented manure; due to a closer C:N ratio and a higher portion of easily soluble plant-available nitrogen which improves the plant availability. By fertilization with fermentation residues, the nutrients are returned to the cultivated areas (closing the material cycle). A fertiliza-

tion rate equivalent to the nutrients removed by the harvested goods is recommended. One should also strive to balance the nutrient requirements of the whole crop rotation system.

Optimized biogas use

Biogas produced in biogas plants is saturated with water vapour and includes, other than the main components of methane and carbon dioxide, also small quantities of other metabolic products from the anaerobic digestion process. Depending on the use of the biogas, these byproducts can be harmful for the utilization system, can decrease the utilization efficiency, can lead to damaging noxious gas emissions or do not allow a mixture with other gaseous energy sources. The different gas uses (function 1: boiler, CHP, micro gas turbine and Stirling engine; function 2: fuel and supply to gas distribution systems; function 3: reformer/fuel cell) require different gas qualities. Which processing steps are important for each function are presented in the detail in the present project. Techniques for gas processing (dewatering, sulphur removal, and methane enrichment) are described and discussed. Depending on the function, the energetic transformation of biogas is described in a manual.

From this project it can be concluded, that the biogas potential from energy plants is very large. Energy plants offer new possibilities of biomass production in diverse crop rotation systems and co-fermentation with manure and high-value organic materials from up- and downstream areas of agriculture. To which degree and in which period these potentials can be transferred into practice however, depends considerably on the prevailing political framework.

1 Einleitung

Die Biogaserzeugung ist eine Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen energetischen und stofflichen Nutzung von agrarischer Biomasse, die den Umwelt- und Klimaschutz deutlich positiv beeinflusst. Nach dem Stand des Wissens 2004, vor Beginn des vorliegenden Projekts, können pro Jahr in Österreich mehr als 5,2 Mio. t CO₂-Emissionen eingespart werden, wenn die Potenziale der Biogaserzeugung genutzt werden. Dies entspricht etwa 60 % der CO₂-Reduktion, zu der sich Österreich im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichtet hat. In der Summe ließen sich in Österreich rund 1,7 Mrd. m³ Methan pro Jahr in Biogasanlagen erzeugen. Um dieses Potenzial erreichen zu können, müssten zukünftig 70 % der Methanproduktion aus der Vergärung von Energiepflanzen stammen und der Rest aus der Vergärung von Wirtschaftsdüngern. Energiepflanzen von Acker- und Grünland haben einen hohen Stellenwert für eine zukunftsweisende Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. Ein optimales Ergebnis wird bei Co-fermentation beider Rohstoffe erreicht, da Wirtschaftsdünger durch ihre hohe Pufferkapazität für einen stabilen Gärverlauf sorgen. Insgesamt könnten aus Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern 17.000 GWh nutzbare Energie pro Jahr erzeugt werden, d.h. ca. 5.600 GWh elektrischer Strom und 11.400 GWh Wärme könnten so bereitgestellt werden. Biogasanlagen mit einer Gesamtleistung von etwa 2.000 MW würden dazu gebraucht werden. Diese Leistung könnte z.B. mit 4.000 Biogasanlagen mit je 500 kW Gesamtleistung oder 8.000 Biogasanlagen mit je 250 kW Gesamtleistung realisiert werden (AMON ET AL. 2003b).

Für die Errichtung der benötigten Biogasanlagen ist ein Investitionsvolumen von ca. 200 bis 300 Mio. € erforderlich. Diese Investitionen fließen direkt in die regionale Wirtschaft ländlicher Regionen. Neben einem kurzfristigen Arbeitskräftebedarf für die Errichtung von Biogasanlagen werden langfristig ca. 6.000 bis 10.000 hoch qualifizierte Arbeitskräfte für den Betrieb der Biogasanlagen benötigt. Die Biogaserzeugung trägt in Zukunft wesentlich zur Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität in ländlichen Regionen bei. Darüber hinaus wird ein hochwertiger organischer Dünger erzeugt, der in flexiblen Düngermanagementsystemen mit hoher Effizienz auf landwirtschaftlichen Nutzflächen eingesetzt werden kann. So wird zusätzlich zur Energieerzeugung und zum Klimaschutz die weitgehende Schließung von Nährstoffkreisläufen ermöglicht.

Die Anzahl der Biogasanlagen nimmt zwar ständig zu, dennoch stellen die derzeit installierten 120 bis 150 Biogasanlagen gerade einmal 6 bis 7 MW elektrische Gesamtleistung bereit. Damit sind bis dato nicht einmal 5 % des möglichen Potenzials umgesetzt. Dies ist vor allem durch Unsicherheiten im Bereich der Energiepflanzenvergärung begründet. Diese Unsicherheiten hindern die Landwirte daran, in diese zukunftsweisende Technologie zu investieren. Es bestehen also nach wie vor große Chancen für die Landwirtschaft, diese neue Einkommensmöglichkeit zu erschließen.

Als Gärrohstoffe für die Biogasgewinnung dienen vielfältige Energiepflanzen und -sorten, z.B. Mais, Wiesengras, Klee gras, Sudangras und Futterrüben und die verschiedenen Formen von Wirtschaftsdüngern landwirtschaftlicher Nutztiere. Für den wirtschaftlichen Erfolg der Biogaserzeugung sind neben den Kosten für Investitionen und Betrieb der Anlagen vor allem das Biogas- und Methanbildungsvermögen der eingesetzten Energiepflanzen und der energetische Wirkungsgrad der anaeroben Gärung von wesentlicher Bedeutung. Kenntnisse über das Gasbildungsvermögen und die erforderlichen Abbauzeiten im Fermenter sind für die optimale An-

passung der Verfahrenstechnik von Biogasanlagen und für die richtige Dimensionierung der baulich-technischen Bereiche essentiell.

Das Biogas- und Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen wird hauptsächlich vom Gehalt an Substanzen geprägt, aus denen Methan gebildet werden kann wie z.B. Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, Stärke und Zucker. Die mikrobielle Verfügbarkeit dieser Nährstoffe ist dabei entscheidend. Wichtige Qualitätsmerkmale von Energiepflanzen zur Biogaserzeugung werden vom Nährstoffgehalt der Gärrohstoffe definiert. Einflüsse auf die diesbezügliche Qualität von Energiepflanzen wirken in verschiedenen Phasen entlang der Erzeugungs- und Nutzungskette (Abbildung 1).

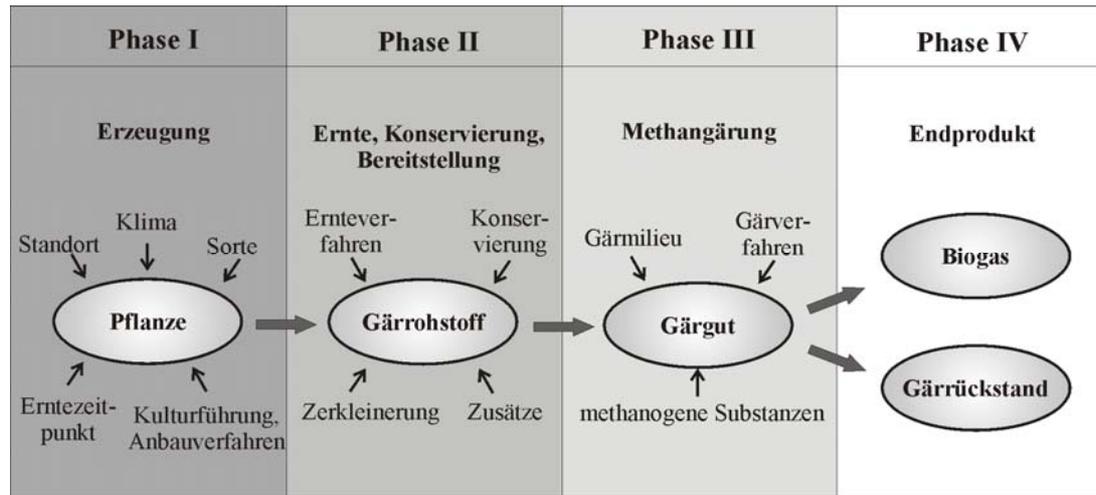


Abbildung 1. Einflüsse auf die Qualität der Pflanzenbiomasse, den Gärrohstoff und das Gärgut bei Nutzung von Energiepflanzen in der Biogaserzeugungskette

Die Qualität von Energiepflanzen zur Biogasnutzung wird bereits auf dem Feld (Phase I) wesentlich geprägt. Neben Standortfaktoren bestimmen vor allem pflanzenbauliche Maßnahmen wie Sortenwahl, Kulturführung, Anbauverfahren und die Reifeentwicklung der Pflanzen zum Zeitpunkt der Ernte den Gehalt und die Verfügbarkeit der Nährstoffe in den Pflanzen, aus denen Methan gebildet werden kann. Im Bereich der Ernte, Konservierung und Biomassebereitstellung (Phase II) beeinflussen das eingesetzte Ernte- und Konservierungsverfahren, die Gär Gutaufbereitung und evtl. verwendete Zusätze die Gärrohstoffqualität und die Menge an Biomasse, die pro Flächeneinheit geerntet werden kann. Während der Methangärung (Phase III) findet die Transformation von der Energie im Gärgut in die Methanenergie des Biogases statt. Auf den Verlauf der Gärung wirken hier eine Reihe von Faktoren wie z.B. die Milieubedingungen der Gärung: Temperatur, pH-Wert, der Gehalt methanbildender Stoffe im Gärgut oder möglicherweise auftretende Hemmstoffe. Aus allen Einflussgruppen der Phasen I bis III resultieren Menge und Qualität des Biogases, sowie der Gehalt an Pflanzennährstoffen im Gärückstand (Phase IV).

1.1 Relevanz des Projekts im Rahmen der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“

Das vorliegende Projekt dient der Förderung der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. Die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen ist ein Verfahren, das sich außerordentlich gut für eine nachhaltige und wirtschaftliche Energieerzeugung eignet. Die Potenziale werden derzeit aber nur unzureichend genutzt, da es eine Vielzahl an Hemmnissen und Unsicherheiten gibt, zu deren Beseitigung aber das vorliegende Projekt beitragen wird. Es werden zuverlässige Daten zu Methanerträgen aus Sonnenblumen, Weizen, Triticale, Roggen, Wiesen gras und Mais ermittelt. Das vorliegende Biogasprojekt trägt durch folgende Punkte zum Gesamtziel der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ bei:

Biogas ist ein zukunftsorientiertes, energieeffizientes und flexibles Energiesystem

Energiepflanzen werden regional erzeugt und zur Methangewinnung in Biogasanlagen vergoren. Aus Energiepflanzen wird in den Biogasanlagen Methangas (Biomethan). Das erzeugte Biomethan kann in Strom und Wärme umgewandelt werden. Für die verschiedenen Energieträger eröffnen sich eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten, die den jeweiligen regionalen Gegebenheiten flexibel angepasst werden können. Nach einer entsprechenden Aufbereitung kann das Biomethan direkt in bestehende Erdgasnetze eingespeist werden. Durch Verdichtung ist es möglich, Biomethan für mobile Antriebe im Verkehr, Transport oder in der Landwirtschaft einzusetzen. Der erzeugte elektrische Strom kann innerbetrieblich genutzt oder in das bestehende kommunale Stromnetz eingespeist werden. Die Wärmeproduktion kann innerbetrieblich zum Betrieb der Biogasanlagen und zum Decken des sonstigen betrieblichen Wärmebedarfs genutzt oder in bestehende Nah- und Fernwärmenetze überführt werden. Mit der erzeugten Wärme könnten aber auch weitere neue Wertschöpfungsketten erschlossen werden. Hier bietet sich z.B. die Trocknung hochwertiger Materialien an, z.B. Parkett- oder Möbelholz, Futter- oder Lebensmittel. Die Umwandlung von Wärme in Kälte durch neue Adsorptions- und Absorptionskältemaschinen erhöht die Flexibilität der Energienutzung zusätzlich. Gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern besitzt Biogas eine sehr wesentliche positive Eigenschaft: die Energie liegt in einer speicherbaren Form vor. Das heißt, Energieerzeugung und -verbrauch müssen zeitlich nicht parallel verlaufen. Biogas kann gespeichert und nach Bedarf zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Eine Spitzenstromerzeugung aus Biogas ist daher möglich.

Das System der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen ist deshalb ein Energiesystem der Zukunft. Es baut auf der Nutzung erneuerbarer Energieträger auf und entwickelt sich als ein hoch flexibles und effizientes Energiesystem, das zudem höchste stoffliche Effizienz aufweist. Die Erzeugung und Bereitstellung der verschiedenen Energieträger aus der Biogaserzeugung ist kostengünstig und zuverlässig. Dies gewährleistet eine hohe Sicherheit der Energieversorgung.

Die Biogaserzeugung stärkt die Regionen

Die Energie wird dezentral in den Regionen erzeugt und genutzt. Energiepflanzen für die Vergärung in Biogasanlagen werden ausschließlich regional erzeugt und das erzeugte Biogas ist regional verfügbar.

Es besteht das Potenzial, dass pro Jahr 200 bis 300 Millionen Euro in den Bau von Biogasanlagen investiert werden. Diese Investitionen bleiben in der Region und stärken die regionale

Wirtschaftskraft. Im Bereich der Erzeugung können Biogasanlagen hervorragend den vorhandenen agrarischen Strukturen angepasst werden.

Der Bau einzelbetrieblicher Biogasanlagen im Leistungsbereich von 80 kW elektrischer Leistung sind genauso möglich, wie (Gemeinschafts-) Biogasanlagen mit > 1 MW elektrischer Leistung. Die Technologie kann den jeweiligen strukturellen Gegebenheiten mit höchster ökologischer Effizienz außerordentlich flexibel angepasst werden. Biogasanlagen sind modular aufgebaut. Die technische Ausgestaltung orientiert sich an den betrieblichen Gegebenheiten und den zu vergärenden Rohstoffen. Auch hier ist ein Höchstmaß an Flexibilität bei gleichzeitiger Einhaltung von Sicherheitsstandards gegeben.

Die Biogaserzeugung schafft neue Arbeitsplätze

Hochwertige und dauerhafte Arbeitsplätze werden neu geschaffen. Für den Betrieb der Biogasanlagen werden zukünftig 6.000 bis 10.000 zusätzliche Arbeitsplätze im Bereich der Landwirtschaft geschaffen. Die Arbeitsplätze zur Biogaserzeugung sind von hoher Qualität. An Biogaserzeuger werden höchste Know-how-Ansprüche in technischen, organisatorischen und fachlichen Bereichen gestellt. Die Arbeitsplatzqualität ist hoch, die Arbeit sehr vielseitig. In der regionalen Bauwirtschaft und im regionalen Handwerk werden ebenfalls mehrere tausend Arbeitsplätze neu geschaffen. Für eine flächendeckende Beratung komplexer Fachbereiche wie beispielsweise dem Management dezentraler Energiemärkte (Biomasse, Methangas, Strom und Wärme) oder der neuen Fermentations- und Konversionstechnologien sind hochqualifizierte Arbeitsplätze dringend erforderlich. Die Wertschöpfung bleibt überwiegend in der Region.

Die Biogaserzeugung erfährt eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung

Die Biogaserzeugung führt zu struktureller, technologischer aber auch sozialer Innovation. Zur bestmöglichen Erzeugung und Nutzung von Biogas und der daraus erzeugbaren verschiedenen Energieformen müssen neue infrastrukturelle Voraussetzungen geschaffen werden, z.B. im Bereich optimaler Anlagenstandorte, die der Beschaffung von Energiepflanzen, der Düngung mit vergorener Biomasse und der Energieverwertung optimal Rechnung tragen müssen. Die Standortfindung und technologische Energieverwertung lösen eine Reihe sozialer Innovationen aus. Das Verantwortungsbewusstsein für die sichere Versorgung und optimale Nutzung mit eigener regionaler Energie wird ansteigen. Dadurch steigt auch das Engagement zur Findung optimaler, den Bedürfnissen und standortspezifischen Verhältnissen angepasster Lösungen im technischen, infrastrukturellen und sozialen Bereich. Alle Abläufe der gesamten Erzeugungskette vom Energiepflanzenanbau über die Düngung bis hin zur Energienutzung bewirken höchste soziale und regionale Integration aller Beteiligten (Energieerzeuger, -vermarkter und -nutzer). Daher kann gesagt werden, dass die in der Biogaserzeugung eingesetzten Technologien und Lösungen eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung erfahren und zur Entwicklung eines Bewusstseins zur Unterstützung ökologischen Wirtschaftens führen.

Biogas stammt aus erneuerbaren Energieträgern

Durch die Biogaserzeugung werden treibhausrelevante Emissionen und negative Umweltauswirkungen auf ein Mindestmaß reduziert. Werden die Potenziale der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern genutzt, so ergibt sich für Österreich eine Reduzierung treibhauswirksamer CO₂-Emissionen um mehr als 5,2 Mio. t CO₂ pro Jahr. Die Vergärung von Wirtschaftsdüngern ist in diese Kalkulation miteinbezogen, weil Energiepflanzen meist auf landwirtschaftlichen Betrieben erzeugt werden, die auch Tierhaltung betreiben und deshalb

Wirtschaftsdünger mitvergären. Wirtschaftsdünger haben ausgezeichnete Eigenschaften als Cosubstrate.

Neben den vielfältigen Energieformen liefert die Biogaserzeugung zusätzlich einen hochwertigen organischen Pflanzendünger, der regional zur Düngung von Kulturpflanzen eingesetzt werden kann. Er kann emissionsarm ausgebracht werden. Ammoniakemissionen und Stickstoffüberschüsse werden so reduziert. Dies bewirkt einen Rückgang der Versauerung, der Eutrophierung und des Aussterbens wenig stickstofftoleranter Pflanzen. Energieaufwändige Mineraldünger können dadurch ersetzt werden. Stoff- und Energiekreisläufe werden somit durch die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen untrennbar miteinander gekoppelt und regional weitgehend geschlossen.

Im Bereich Biogas besitzt Österreich eine Vorreiterrolle

Das Projekt baut auf österreichische Stärken auf. Im Bereich der Forschung auf dem Methanenergiewertmodell (MEWM) für Energiepflanzen und auf der Begleitforschung an Biogasanlagen und im Bereich der Technologie auf dem europaweit einzigartigen ÖKL-EU-ALTENER-Standard für den Bau und Betrieb von Biogasanlagen. Durch die aktive Teilnahme maßgeblicher Technologie- und Know-how-Führer in wichtigen Bereichen der Erzeugungs- und Wertschöpfungskette der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen werden maßgebliche Impulse gesetzt, die neue Chancen für die österreichische Wirtschaft eröffnen.

Das Projekt bearbeitet umfangreiche Fragestellungen, die geklärt werden müssen, um die vorhandenen Potenziale im Bereich der Biogaserzeugung nutzen zu können. Folgende Aspekte finden Berücksichtigung: bedarfsgerechte Nährstoffversorgung von Fermentersystemen, gezielte Nährstoffbedarfskalkulation beim Einsatz von Energiepflanzen, genaue Kalkulation des spezifischen Methanbildungsvermögens dieser Energiepflanzenarten anhand ihrer Rohnährstoffe (Weiterentwicklung des Methanenergiemodells), genaue Kalkulation standortspezifischer Methanhektarerträge, Empfehlungen zur erforderlichen hydraulischen Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter und zur optimalen Fermentergröße, Datengrundlage zur Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen abhängig von Art, Menge und Zusammensetzung der Energiepflanzen, Sortenempfehlungen, Empfehlungen zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts für die Energiepflanzen, Empfehlungen zur stofflichen Zusammensetzung von Energiepflanzenmischungen für einen hohen energetischen Wirkungsgrad der Methangärung mit hoher Qualität des Biogases. Die neuen Erkenntnisse sollen in allen Biogasanlagen umgesetzt werden, sie besitzen daher ein hohes Maß an Multiplizierbarkeit. Das Projekt ermöglicht daher insgesamt die weitere Entwicklung und Absicherung der österreichischen Technologieführerschaft in allen Schlüsselbereichen des Gesamtsystems der Biogaserzeugung vom Anbau der Energiepflanzen, der Bereitstellung der Primärenergieträger (Energiepflanzen), der Fermentationstechnologie bis hin zur kreislaufschließenden Düngung und verschiedenster Energie- und Servicedienstleistungen.

2 Stand des Wissens

2.1 Literatur

Die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen beginnt mit Anbau, Ernte und Konservierung der Pflanzen. Die Techniken hierfür sind ausgereift und im bewährten Praxiseinsatz. Ganzpflanzensilagen aller Arten von Halmfrüchten werden mit Exaktfeldhäckslverfahren und Silagebereitung erzeugt. Körner-, CCM- und Futterrübenlinien werden nach Zerkleinerung im Hochsilo konserviert. Offene Fragen bestehen bezüglich der Methanmenge, die aus der anaeroben Vergärung von Energiepflanzen gewonnen werden kann. Verschiedene Energiepflanzenarten wie z.B. Wiesengras, Luzerne, Klee und Klee gras, Getreide (Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Triticale), Futterrüben, Mais und Zuckerhirse werden seit kurzem als Rohstoffe zur Biogaserzeugung in praktischen Anlagen eingesetzt. Praxis- und Laboruntersuchungen dienen der Ermittlung des Biogasbildungsvermögen dieser Rohstoffe (NORDBERG 1996, BORJESSON 1998, KAPARAJU ET AL. 2001, BASERGA & EGGER 1998, CHYNOWETH ET AL. 1993, LINKE ET AL. 1999, POUECH ET AL. 1998a/b, AMON ET AL. 2002b).

Untersuchungen von BJÖRNSSON ET AL. (2001) zur Vergärung von Ernterückständen zeigen eine spezifische Methanausbeute von Zuckerrübenblättern, Gras und Weizenstroh von $0,37$, $0,23$ bzw. $0,15 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Die Untersuchungen wurden in Batchfermentern mit einer Größe von $1\text{--}30 \text{ m}^3$ bei einer Gärtemperatur von 37°C durchgeführt. Die hydraulische Verweilzeit betrug $30\text{--}55$ Tage. Die Untersuchungen enthalten keine Information darüber, ob sich die Methanausbeuten auf Normbedingungen ($p_o = 1,0133 \text{ bar}$, $t_o = 0^\circ\text{C}$) beziehen oder nicht. KAPARAJU ET AL. (2001) untersuchten die Cofermentation von Energiepflanzen mit Abfällen aus der Süßwarenherstellung und Rinderfestmist. Es wurden Langzeit-Batch-Untersuchungen im Labor und anschließend Praxisuntersuchungen durchgeführt. Batchversuche mit mesophil vergorenem Rindermist als Inoculum zeigten eine spezifische Methanausbeute von $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$ bei Grasheu und $0,26 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$ bei Hafer. Klee im vegetativen Wachstumsstadium zeigte eine spezifische Methanausbeute von $0,21 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Im Wachstumsstadium der Blüte hatte Klee lediglich noch einen spezifischen Methanertrag von $0,14 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Das Wachstumsstadium der von KAPARAJU ET AL. (2001) untersuchten Pflanzen beeinflusste den Methanertrag wesentlich. POUECH ET AL. (1998a) untersuchten die Methanproduktion verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Langzeit-Batch-Gärversuchen. Es wurden die Pflanzenarten Weizen, Gerste, Alfalfa, Klee, Weidegras, Mais, Futtersorghum, Korn sorghum und Zuckersorghum verwendet. Bei Weizen, Klee und Weidegras wurde die Methanproduktion zu unterschiedlichen Wachstumsstadien der Pflanzen gemessen und dabei der Einfluss der biochemischen Pflanzenzusammensetzung, vor allem des Gehalts an Cellulose und Hemicellulose und des C-H-O-N-Verhältnisses, auf die spezifische Methanausbeute und den Verlauf der Gärung untersucht. Der Methanertrag lag zwischen $0,295$ und $0,397 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$. Der biologische Abbaugrad der Pflanzen lag zwischen 57% bei Alfalfa und 88% bei Weizen. Mais zeigte den höchsten spezifischen Methanertrag. Auch Leguminosen zeigten hohe Erträge. Angaben zur biochemischen Zusammensetzung der Pflanzen werden in Bezug auf die Qualität und den Gehalt der Rohfaser sowie den Gesamtstickstoffgehalt der Pflanzen gemacht, nicht aber zu den übrigen, das Methanbildungsvermögen bestimmenden Nährstoffen wie Fettgehalt oder stickstofffreien Extraktstoffen (NfE) der Pflanzen. Die Biogausbeute aus Energiepflanzenarten ist noch nicht optimiert worden. Angaben zu den wichtigen

Inhaltsstoffen der eingesetzten Rohstoffe sind nur vereinzelt zu finden. Rohfaser, Cellulose, Hemicellulose, Rohfett, Rohprotein, NfE, NH_4 -Gehalt und pH-Wert prägen den Verlauf der Methangärung.

Für den deutschsprachigen Raum wurde von einer Expertengruppe aus Deutschland und Österreich umfangreiches Datenmaterial zur Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zusammengetragen (KTBL 2005). Es werden Mittelwerte für Biogas- und Methanerträge aus Laborversuchen für verschiedenste Gärsubstrate angegeben. Die vorliegende Datenbasis gibt damit wertvolle Richtwerte, die in Zukunft laufend aktualisiert werden sollten. Eine Weiterentwicklung sollte in Hinblick auf die Darstellung von standortspezifischen Unterschieden erfolgen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die in der Literatur veröffentlichten Daten zum Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen.

Tabelle 1. Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen nach Literaturangaben

| <i>Energiepflanze</i> | <i>Biogasertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹] | <i>Methanertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹] | <i>Methode</i> | <i>Quelle</i> |
|---------------------------|--|--|-------------------|-----------------------|
| Alfalfa | | 340 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Alfalfa-Silage | | 240* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Futterroggen-Grüngut | | 431 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Futterrüben | | 411–430 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Futterrüben | 750 | | Biogasanlage | SEDLMEIER 2000 |
| Getreide Ganzpflanzen | 780 | | k.A. | KTBL 1996 |
| Getreidestroh | 250–350 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Grasmischung-Silage | | 199–244* | Laborflusdigestor | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Grasmischung-Silage | | 298–315* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Grassilage | 500–600 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Grassilage | 627 | | k.A. | KTBL 2005 |
| Gras-Welksilage | | 433 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Gras (verschiedene Arten) | 678–929 | | Batch-Versuch | MÄHNERT ET AL. 2002 |
| Grünschnitt | 780 | | k.A. | KTBL 1996 |
| Hafer | | 365 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Hanf-Silage | | 409 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Heu | 500 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Hirse | 635 | | k.A. | KTBL 2005 |
| Kartoffelkraut | 500–600 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Klee | | 350 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Klee | 500–650 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Klee | 264 | 152 | Laborflusdigestor | POUECH ET AL. 1998b |
| Laub | 400 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Luzerne-Grüngut | | 432 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Mais | | 397 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Maissilage | | 181–184* | Laborflusdigestor | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Maissilage | | 270–289* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |

| <i>Energiepflanze</i> | <i>Biogasertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹] | <i>Methanertrag</i> [l (kg oTS) ⁻¹] | <i>Methode</i> | <i>Quelle</i> |
|------------------------|--|--|-------------------|-----------------------|
| Maissilage (Teigreife) | 642 | | k.A. | KTBL 2005 |
| Maisstroh | 500 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Miscanthus -Silage | 531 | | k.A. | KTBL 2005 |
| Parthenium | | 152±15 | Batch-Versuch | GUNASEELAN 1995 |
| Pferdebohnen-Silage | | 356* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Pferdebohnen-Silage | | 226* | Laborflusdigestor | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Raps | | 336 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Raygras | | 390–409 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Reisstroh | 380–471 | 188–240 | Laborflusdigestor | ZHANG UND ZHANG 1999 |
| Roggenstroh | | 409 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Rübenblatt | 400–500 | | k.A. | BASERGA 2000 |
| Silomais | | 422 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Sorghum | | 295–372 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Weizen | | 384 | Batch-Versuch | POUECH ET AL. 1998a |
| Weizen | 332 | 184 | Laborflusdigestor | POUECH ET AL. 1998b |
| Wicken-Silage | | 323* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Wintergerste | | 420 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Winterroggen | | 419 | Berechnung | LINKE ET AL. 1999 |
| Zuckerrübenblattsilage | | 294* | Batch-Versuch | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |
| Zuckerrübenblattsilage | | 174* | Laborflusdigestor | ZAUNER & KÜNTZEL 1986 |

* l (kg TS)⁻¹; k.A. = keine Angabe

Bisherige Untersuchungen zum Biogas- bzw. Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen wurden unter verschiedenen methodischen Rahmenbedingungen durchgeführt. Sie sind deswegen nur eingeschränkt vergleichbar und insgesamt nicht ohne Weiteres auf praktische Verhältnisse übertragbar. Um einen Vergleich mit anderen Untersuchungen und mit Erträgen von praktischen Biogasanlagen zu ermöglichen, müssen die Versuchsergebnisse (Biogas- und Methanertrag) auf Normbedingungen (N: 0 C°, 1013 mbar) bezogen werden. Dazu werden aber in den meisten Fällen keine Angaben gemacht. Oftmals ist bei den Untersuchung auch nur der Biogasertrag angegeben. Für die Energiegewinnung entscheidend ist aber der Methangehalt im Biogas und somit der Methanertrag. Der Methangehalt unterliegt je nach Gärbedingungen starken Schwankungen.

Um Datenmaterial besser vergleichen zu können, ist es nach SCHLATTMANN ET AL. (2005) sinnvoll, sich an bestimmte Richtlinien wie z.B. die VDI-Richtlinie 4630 zu halten und Rohdaten der Versuche in einem zentralen Datenbanksystem zu erfassen. In dem von SCHLATTMANN ET AL. (2005) entwickelten Datenbanksystem können Daten in einer stündlichen Auflösung aufgenommen werden. Fehlende Werte können dann durch eine Interpolation von benachbarten Messpunkten ermittelt werden. Bei der Integration von Werten in das Datenbanksystem müssen die Rohdaten manuell gesichtet werden, um unrealistische Werte zu eliminieren bzw. zu korrigieren. Die normierten Biogasmengen können durch Umrechnung der Gaserträge auf Normbedingungen und durch Abzug des Wasserdampfvolumentstroms ermittelt werden. Die normierte Methanproduktion kann über die Methankonzentration im Biogas berechnet werden,

wobei die benötigte Methankonzentration bei einer Messung aus dem kontinuierlichem Gasfluss durch Interpolation zweier benachbarter Werte ermittelt bzw. bei Sammlung des Gases in Beuteln die Methankonzentration direkt herangezogen werden kann. Die Menge an zugeführten Gärsubstraten wird komponentenweise für jede Substratmischung manuell erfasst. Aufgrund der Inhaltsstoffanalysen der Gärsubstrate kann die chemische Zusammensetzung der Substratmischungen errechnet werden. Eine Software übernimmt die Analyse der Daten. Das Datenbanksystem wurde überprüft. Die Gasmenge und Gasqualität wurde neben der stündlichen Aufzeichnung auch manuell täglich erfasst und normiert. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass die Ergebnisse der stündlichen Datenerfassung ($266 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1} \pm 19,6 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$) nahezu identisch mit jenen der täglichen Erfassung sind ($265 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1} \pm 19,5 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$). Das bedeutet, dass eine zeitlich hochauflösende Ermittlung der Gaserträge nur notwendig ist, wenn eine genaue Betrachtung der Prozesskinetik durchgeführt oder eine Basis für mathematische Modelle erstellt werden soll. Um natürliche Schwankungen auszugleichen, wird eine dreimalige Wiederholung eines Versuchs als sinnvoll betrachtet.

SCHLATTMANN ET AL. (2005) verglich auch das Batch- und Durchflussverfahren zur Bestimmung der Biogas- und Methanproduktion. Obwohl durch die Probenentnahme beim Batchverfahren die Substratmenge verringert wird, konnten sie keinen Unterschied zwischen den beiden Laborverfahren feststellen.

Um Energiepflanzen als Gärsubstrat optimal einzusetzen, ist es auch wichtig, dessen Gärverhalten genau zu kennen. Dadurch kann der Betrieb einer Biogasanlage optimal auf ein Substrat eingestellt werden. MUKENGELE ET AL. (2006) untersuchten das Energieertragspotenzial verschiedener Energiepflanzen (Maissilage, Winterweizen, Kleegrassilage, Futterrübensilage und Roggenganzpflanzensilage) in der Alleinvergärung sowie in Mischungen mit Maissilage im Verhältnis von 25, 50 und 75 %. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass die Energiepflanzen bei einer Alleinvergärung ein Ertragspotenzial von $0,365$ bis $0,430 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 (\text{kg oTS})^{-1}$ hatten. Im Vergleich zu den mit Hilfe der Methanerträge der Einzelsubstrate berechneten Erträgen der Mischungen ergaben sich im Laborversuch um bis zu 8 % höhere Methanerträge der Mischungen. Dieser Synergieeffekt lässt sich aufgrund der besseren Verfügbarkeit der Nährstoffe in der Mischung erklären. Die Untersuchungen haben auch einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Fasergehalt der Substrate und dem jeweiligen Methanertrag gezeigt. Je höher der Fasergehalt, desto geringer waren die Methanerträge.

Die Mitvergärung von Feststoffen in Flüssigvergärungsanlagen ist aber nur begrenzt möglich, da zu hohe Trockenmassegehalte Probleme bei der Manipulation der Substrate verursachen (insbesondere dann, wenn das Substrat auch höhere Anteile an verholzter Biomasse und an Steinen aufweist). Diese Substrate können besser in Systemen mit Feststoffvergärung verwendet werden. Für die Landwirtschaft sind diskontinuierliche Systeme interessant, da sich diese aufgrund ihrer Robustheit und Flexibilität auszeichnen. Bei diesen Systemen wird das stapelfähige Substrat in die Fermenter gefüllt und für mehrere Wochen vergoren. Der Feststoff kann diskontinuierlich mit Perkolat berieselt oder geflutet werden. Gärsubstrate brauchen einen bestimmten, substratspezifischen Anteil an schon vergorenem Material, damit eine zu starke Versäuerung des Substrats in der Anfangsphase unterbunden wird und die Methanbindung zügig und vollständig abläuft. Energiereiche Substrate brauchen einen höheren Anteil an vergorenem Material als Substrate mit einem geringeren Energiegehalt. Die derzeit häufig verwendeten Verfahren der Feststoffvergärung benötigen eine Beimischung von bis zu 80 % an

Gärresten. Dadurch müssen die Fermenter entsprechend groß dimensioniert werden, wodurch sich auch wiederum hohe Investitionskosten ergeben.

Ein spezielles System der Vergärung von Feststoffen ist ein berieselter Boxenfermenter. Bei diesem System wird das Perkolat am Fuß des Fermenters gefasst, in einem Tank zwischengespeichert und bei Bedarf wieder verrieselt. Das Perkolat enthält die an der Methanbildung beteiligten Mikroorganismen sowie während der Vergärung gebildeten organischen Säuren. Eine hohe Konzentration an Milchsäure bei tiefem pH-Wert wirkt bakterizid. Eine schnelle Versäuerung des Substrats im Fermenter stellt eine kritische Phase dar und kann durch das Ausspülen der Säuren verringert werden, wenn z.B. das Perkolat eines frisch angesetzten Fermenters mit dem Perkolat aus einem Fermenter mit bereits stärker abgebauten Substraten vermischt wird. Im Perkolationsystem ist es notwendig, dass das zu vergärende Substrat gut strukturiert ist, sodass das Perkolat gut hindurchsickern kann.

In einer Untersuchung von KAUSCH UND FISCHER (2006) wurde untersucht, ob eine Vergärung von Maissilage auch ohne Beimischung von Gärresten möglich ist. Bei dieser Untersuchung wurde ein System verwendet, das aus zwei Fermentern mit 5,5 Wochen vergorener Biomasse, einem Fermenter mit 3,5 Wochen vergorener Biomasse, einem Fermenter mit frischer Maissilage und einem Fermenter mit Perkolat bestand. Die Methanbildung des Systems betrug innerhalb von 18 Tagen $328 \text{ NI CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}$. Alle Fermenter waren an der Methangasproduktion beteiligt, wobei der Fermenter mit dem frischen Substrat erst mit Verzögerung an der Methanbildung beteiligt war. Der pH-Wert des Perkolats des frisch angesetzten Fermenters sank nur in den ersten 3 Tagen unter 7 und lag danach in einem Bereich von 7,8 bis 8. Der Versuch zeigte, dass auf die Zugabe von Gärresten bei der Vergärung von Maissilage verzichtet werden kann, wenn das Perkolat von mehreren Fermentern, die einen unterschiedlichen Abbaugrad des Substrates aufweisen, vermischt wird und anschließend wieder zur Berieselung herangezogen wird.

In der Literatur weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass der „Cellulose-Lignin-Komplex“ die Abbaubarkeit der Substrate ungünstig beeinflusst (GALLERT & WINTER 1998, KRIEG & FISCHER 2002). So wirkt sich insbesondere die Inkrustierung von abbaubaren Komponenten, z.B. von Cellulose durch Lignin nachteilig auf den anaeroben Abbau und die Biogaserzeugung aus, da nur die frei liegenden Anteile dem mikrobiellen Abbau zugänglich sind (WEILAND 2001, JÄGER 2002). Nach EDELMANN (2001) ist die generelle Abbaubarkeit der organischen Substanz vom Gehalt an Nährstoffen und Gerüstsubstanzen wie z.B. Cellulose und Lignin abhängig. Der Gehalt an Gerüstsubstanzen bestimmt nicht nur die Abaufähigkeit, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der die organische Substanz abgebaut wird. Die Methanausbeute aus der Biomasse wird durch den Gehalt an Eiweiß, Fett, Rohfaser (Lignin und Strukturkohlenhydrate: Cellulose, Hemicellulose und Pektin) und den N-freien Extraktstoffen, im Wesentlichen Zucker und Stärke, bestimmt. Die Konzentration dieser wertgebenden Inhaltsstoffe ändert sich mit dem Alter der Pflanzen (KIRCHGESSER 1992, RIEDER 1983, KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Sie kann auch sortenspezifischen Charakter haben (SCHNÜRER ET AL. 1999). Der Zeitpunkt, an dem die eingesetzten pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden, sowie Sorteneigenschaften sind deshalb in Bezug auf die Methanausbeute aus der Biomasse und auf die Methanmenge, die pro Hektar geerntet werden kann, von wesentlicher Bedeutung.

Untersuchungen zum Methanbildungsvermögen von Sudangrassilage zeigen einen spezifischen Methanertrag von 0,213 bis 0,239 $\text{Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}$ (AMON ET AL. 2002a). Die Unter-

suchungen zeigen, dass der Ligningehalt im Gärgut die Methanproduktivität bestimmt und dass der Biomassehektarertrag stark sortenabhängig ist. Inhaltsstoffe und Sortenwahl stellen also die wesentlichsten Ertragsfaktoren für die Methanproduktivität pro Flächeneinheit dar.

Das Hauptproblem des anaeroben Abbaus von Biomasse liegt in der Vergärung des „Cellulose-Lignin-Komplexes“ und in der optimalen Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Für eine bedarfsgerechte Ernährung der Mikroorganismen müssen Grundlagen zur Entwicklung von Nährstoffbedarfsnormen erstellt werden.

Für Silomais und Klee gras wurden die gärtechnischen Eigenschaften und der Methanenergiewert (MEW) samt aller damit verbundenen Vorteile für eine optimale Biogaserzeugung in einem ersten Ansatz ermittelt (AMON ET AL. 2003c). Wie die Untersuchungen zum Methanbildungsvermögen von Mais zeigen, bestimmen Eiweiß- und Fettgehalt der Energiepflanzen das Methanbildungsvermögen am stärksten. Der Rohfasergehalt ist für die Methanbildung von geringem Einfluss. Der Gehalt an N-freien Extraktstoffen mindert das Methanbildungsvermögen leicht.

Mit den vorliegenden Modellen zur anaeroben Gärung (BATSTONE ET AL. 2001, BATSTONE ET AL. 2000, ANGELIDAKI ET AL. 1993, HENZE ET AL. 1986, PAVLOSTATHIS & GOSSETT 1986, MC CARTY & MOSEY 1991, ZATARI ET AL. 2001) kann eine gezielte und bedarfsgerechte Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter mit Nährstoffen nicht berechnet werden. Die Modelle sind meist sehr spezifisch und beziehen sich hauptsächlich auf die Modellierung der Kinetik der Gärung, wie z.B. zur theoretischen Darstellung und Optimierung wichtiger Prozessgrößen der Gärbiologie wie dem pH-Wert, dem Ammoniumgehalt oder dem Gehalt an flüchtigen Fettsäuren im Gärgut. Weitere Anwendungsbereiche liegen hauptsächlich in der theoretisch technischen Optimierung von Fermenterkonfigurationen und in der Prozesstechnologie. Die Modelle beziehen sich meist auf spezifische Anwendungsbereiche der anaeroben Behandlung von Abfällen und nicht auf den in Zukunft bedeutungsvollen Bereich der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffen.

BUSWELL (1936) und BOYLE (1977) haben eine Formel entwickelt, mit der die Biogaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , H_2S und NH_3) aus der chemischen Grundstruktur der Biomasse, Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel, berechnet werden kann. Nach ihren Untersuchungen definiert die chemische Struktur der Verbindung (Kohlenhydrate, Eiweiß, Fett) den prozentualen Anteil an Methan im Biogas, der bei ihrem Abbau gebildet werden kann. Die Berechnungen tragen aber der Praxis nicht ganz Rechnung. Neben der Biogasqualität ist vor allem das spezifische Methanbildungsvermögen von Gärrohstoffen für die Praxis interessant. Zum ändern gehen die Berechnungen von BUSWELL (1936) und BOYLE (1977) von der durchschnittlichen chemischen Grundzusammensetzung (C, H, N, S) der Stoffe: Eiweiße, Kohlenhydrate und Fette aus. In der Praxis liegen jedoch Informationen vorwiegend zum Gehalt an den Stoffgruppen in den Gärrohstoffen vor und weniger über die chemische Grundzusammensetzung der einzelnen Stoffgruppen. Dabei können die genannten Stoffgruppen ihrerseits unterschiedliche Qualität aufweisen. Zum Beispiel kann die Gruppe der Kohlenhydrate eine weite Palette von unterschiedlichen Stoffen wie z.B. Zucker, Stärke, Cellulose und Hemicellulose enthalten. Diese sind in ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem physiologischen Wert für den anaeroben Stoffwechsel nicht einheitlich. Art- und Menge der intermediären Stoffwechselprodukte können sich deshalb bei der anaeroben Umsetzung der verschiedenen Kohlenhydratgruppen unterscheiden. Und schließlich setzt die Formel von BUSWELL (1936) und BOYLE

(1977) voraus, dass die Substanzen vollständig abgebaut werden, was bei der Vergärung von Energiepflanzen praktisch nicht der Fall ist. Darüber hinaus berücksichtigt die Formel nicht, dass Komponenten des Biogases zum Teil in Lösung gehen. So ist der tatsächliche Anteil an Methan im Biogas in der Regel höher, als aufgrund der theoretischen Berechnung zu erwarten wäre (WELLINGER ET AL. 1984).

Für Silomais und Klee gras wurden von AMON ET AL. (2003c) die gärtechnischen Eigenschaften und in einem ersten Ansatz der Methanenergiewert (MEW) für eine optimale Biogaserzeugung ermittelt. Es ist nun erforderlich, das Methanenergiewertmodell (MEWM) weiterzuentwickeln und weitere wichtige Energiepflanzen (Sonnenblumen, Weizen, Triticale, Roggen und Wiesen gras) zu integrieren. Der MEW dieser Energiepflanzenarten ist eine der wesentlichsten Grundlagen für die optimale Biogaserzeugung entlang der gesamten Erzeugungskette vom Anbau der Energiepflanzen bis hin zur Qualität des Biogases und kann längerfristig als Instrument für die optimale Biogaserzeugung in folgenden wichtigen Bereichen eingesetzt werden:

- zur genauen Kalkulation des spezifischen Methanbildungsvermögens dieser Energiepflanzenarten anhand ihrer Rohnährstoffe
- zur gezielten Nährstoffbedarfskalkulation bei Einsatz dieser Energiepflanzen
- für Empfehlungen zur erforderlichen hydraulischen Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter und zur optimal angepassten Fermentergröße
- zur Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen abhängig von Art, Menge und Zusammensetzung der Energiepflanzen
- für Sortenempfehlungen
- zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts für die Energiepflanzen
- für Empfehlungen zur stofflichen Zusammensetzung von Energiepflanzenmischungen für eine hohe Qualität des Biogases
- zur genauen Kalkulation standortspezifischer Methanhektarerträge von Energiepflanzenarten, -sorten und Fruchtfolgen.

Diese Aufgaben können erfüllt werden, wenn Qualitätssicherungsverfahren zur Anwendung kommen, die eine energetische und stoffliche Bewertung der Methangärung in Abhängigkeit der Inhaltsstoffe der Energiepflanzen ermöglichen. Das MEWM liegt derzeit als erster Entwicklungsschritt für Silomais und Klee gras vor (AMON ET AL. 2004a). Weitergehende Untersuchungen, die der Erhöhung der Aussagesicherheit und der Steigerung der Bewertungsgenauigkeit der bestehenden Modelle dienen, sind notwendig. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Mais alleine durch die Wahl der Sorte der Methanhektarertrag um bis zu 40 % schwanken kann. Durch die Wahl des Erntezeitpunkts tritt eine Variation im Methanhektarertrag um 20 % auf. Durch den Anbau geeigneter Sorten und die Wahl des richtigen Erntezeitpunkts können von der Rohstoffseite her bestehende Potenziale bestmöglichst ausgenutzt werden (AMON ET AL 2003b, c). Erste Empfehlungen liegen für Silomais und Klee gras vor, nicht aber für die weitere Palette an Energiepflanzen. Das MEWM soll längerfristig die Festlegung von Anforderungen an die Rohstoffqualität der wichtigen Energiepflanzen (Sonnenblumen, Weizen, Triticale, Roggen, Wiesen gras, Mais) ermöglichen, die dann in ökologisch ausgewogenen, standortangepassten Fruchtfolgesystemen nachhaltig erzeugt werden sollen. Zur Düngung der Energie-

pflanzen werden deren Gärrückstände aus den Biogasanlagen eingesetzt, wodurch die weitgehende Schließung von Stoffkreisläufen erreicht wird.

2.2 Eigene Vorarbeiten zum Thema

Cofermentation von Wirtschaftsdüngern mit Energiegräsern in landwirtschaftlichen Biogasanlagen: Optimierung der Gärgutmischung und des Biogasertrags (Förderung: Bodenkulturpreis der Wiener Wirtschaftskammer)

Es wurden systematische Untersuchungen zum Gärverhalten der Energiegraspflanze „Zuckerhirse“ bei Cofermentation mit Rinderflüssigmist durchgeführt. Die Wirkung des Reifestadiums der Zuckerhirse, des Konservierungsverfahrens und der Effekt des Mischungsverhältnisses mit dem Wirtschaftsdünger auf den spezifischen Methanertrag und den Verlauf der Methangärung wurden ermittelt. Die Versuche wurden mit Hilfe von Eudiometer-Messzellen im Batchverfahren bei konstanten und exakt eingestellten Gärbedingungen durchgeführt (DIN-Norm 38414). Empfehlungen für Biogasanlagenbetreiber bezüglich der Gärgutauflbereitung und -konservierung, des optimalen Mischungsverhältnisses von Zuckerhirse und Rinderflüssigmist und zur erforderlichen hydraulischen Verweilzeit des Gärgutes wurden abgeleitet. Dadurch wurde erreicht, dass Energiegräser verstärkt zur umweltfreundlichen und kostengünstigen Biogaserzeugung eingesetzt werden können. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Lignin im Gärrohstoff das Methanbildungsvermögen mindert (AMON ET AL. 2002a).

Methanbildungsvermögen von Mais – Einfluss der Sorte und des Erntezeitpunkts (Förderung: Firma Pioneer)

Für verschiedene Maissorten wurde der Einfluss des Erntezeitpunkts auf die spezifische Methanproduktion und auf den Verlauf der Methangärung untersucht. Die Untersuchungen wurden im Eudiometer nach DIN-Norm 38414 unter definierten und kontrollierten Gärbedingungen durchgeführt. Als Impfsubstrat wurde aktives Gärgut aus Biogasanlagen mit Energiepflanzenutzung verwendet. Die Untersuchungen dienten der Optimierung von Gärgutmischungen, der Auswahl geeigneter Sorten und der Bestimmung des optimalen Reifestadiums bzw. des Erntezeitpunkts verschiedener Silomaissorten. CO₂- und CH₄-Konzentrationen im Biogas wurden mittels Gaschromatographie bestimmt. Zu Beginn und am Ende jedes Versuchs wurden Inhaltsstoffanalysen der Gärstoffe durchgeführt. Als Effizienzkriterien der Methangärung wurden die Prozessparameter spezifischer Biogasertrag, spezifischer Methanertrag, Biogasqualität (Methangehalt), Abbaugrad der organischen Substanz und Inhaltsstoffe des Gärgutes (organischer Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Lignin, Cellulose, Hemicellulose, organischer Kohlenstoff, flüchtige Fettsäuren) herangezogen (AMON ET AL. 2002b).

Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras (im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01)

Das Methanbildungsvermögen – der Methanenergiewert (MEW) – der Gärrohstoffe Mais und Klee gras wurde ermittelt. Der Stoff- und Energieumsatz wurde im Eudiometer-Batch-Experiment bei 40°C untersucht (DIN-Norm 38414).

Die verwendeten Gärrohstoffe wurden aus Sortenversuchen verschiedener Standorte gewonnen. Zum Einsatz kamen früh- bis spätreife Silomaissorten vom Trockenstandort Groß-

Enzersdorf (PR 39 G12, Sandrina, Clarica, Monalisa, Ribera) und vom Standort Ludersdorf/Steiermark, einem Gunststandort für den Maisanbau (Benicia, Ribera, Phönix, Atalante, Saxxo). Beim Klee gras wurden die Mischungen Feldfutter-Intensivmischung (IM), Dauerwiesenmischung (DM) und Klee grasmischung (KM) vom Standort Gumpenstein/Ennstal verwendet. Ernte und Ertragsermittlung der Gärrohstoffe erfolgten im Verlauf der Vegetation jeweils zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Der Einfluss der Silage- und Heubereitung auf das Methanbildungs vermögen der Gärrohstoffe wurde ebenfalls untersucht. Der Methanenergiewert von Silomais und Klee gras kann mit Hilfe des Methanenergiewertmodells nach der in Tabelle 2 dargestellten Regressionsgleichung aus den Inhaltsstoffen der Energiepflanzen berechnet werden.

Tabelle 2. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung der Methanenergiewerte von Klee gras und Mais

| Inhaltsstoff | Einheit | Regressionskoeffizienten | |
|--|---------|--|---|
| | | Klee gras | Mais |
| Rohprotein (XP) | % TM | 11,77 | 28,66 |
| Rohfett (XL) | % TM | 4,46 | 13,63 |
| N-freie Extraktstoffe (XX) | % TM | -1,60 | -0,10 |
| Rohfaser (XF) | % TM | 5,56 | 0,10 |
| Qualitätsparameter der Gesamtgleichungen | | $R^2 = 0,998$; F-Wert = 305,036; Durbin-Watson-W. = 1,447; Signifikanzniveau = 0,003; n = 6 | $R^2 = 0,984$; F-Wert = 405,179; Durbin-Watson-W. = 1,483; Signifikanzniveau = 0,000; n = 30 |

Die Maissorten zeigten ein charakteristisches spezifisches Methanbildungs vermögen, welches wesentlich vom Gehalt und dem Verhältnis der Nährstoffkomponenten (Inhaltsstoffe) zueinander abhängig war. Nährstoffmuster und -gehalt werden am stärksten vom Stadium der Vegetationsentwicklung der Pflanzen beeinflusst. Besonders gut eignen sich Sorten mit hohem Roh eiweiß- und Rohfettgehalt und hohem standortspezifischem Biomassebildungs vermögen. Die N-freien Extraktstoffe mindern das Methanbildungs vermögen von Silomaissilage leicht. Durch die Wahl des Erntezeitpunkts traten Variationen im Methanhektarertrag von bis zu 40 % auf. Die Silagebereitung erhöhte die spezifische Methanbildung um 15 % im Vergleich zu nicht konserviertem Mais. Nach 39–42 Gärtagen waren 95 % der maximal erreichbaren Methanmenge aus der Silomaissilage gebildet worden. Daraus ergibt sich für die Praxis unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages von 10 % eine erforderliche hydraulische Verweilzeit von 41 bis 44 Gärtagen, bei einer Gärtemperatur von 40°C.

Bei Klee gras zeigten die untersuchten Mischungen zum jeweiligen Erntezeitpunkt ein ähnlich spezifisches Methanbildungs vermögen. Die Rohnährstoffgehalte und das Nährstoffmuster der Klee grasmischungen waren zum jeweiligen Vegetationsstadium der Bestände ebenfalls ähnlich. Das spezifische Methanbildungs vermögen der Klee grasmischungen wurde am stärksten von der Vegetationsentwicklung der Pflanzenbestände zum Zeitpunkt der Ernte bestimmt. Besonders gut geeignet sind Sortenmischungen, die einen hohen Rohprotein- und Rohfettgehalt in der Silage aufweisen. Rohfaser und N-freie Extraktstoffe trugen wenig zur Methanbildung der Klee grassilage bei. Abweichungen vom optimalen Erntetermin durch zu späte Ernte

verursachten Ertragsminderungen der Methanmenge pro Hektar um bis zu 25 %. Die Heubereitung bewirkte im Vergleich zu grüner, nicht konservierter Biomasse einen Mehrertrag an Methan von 12 %. Durch die Silagebereitung wurde ein Mehrertrag von 26 % erreicht. Nach 41–44 Gärtagen waren 95 % der möglichen Methanmenge aus der Kleeegrassilage und dem Heu gebildet worden. Für die Praxis ergibt sich daraus bei einem Sicherheitszuschlag von 10 % für Klee gras eine erforderliche hydraulische Verweilzeit von 45 bis 47 Gärtagen bei einer Gärtemperatur von 40°C (AMON ET AL. 2003c).

Stoff- und Energiewechselmessungen bei der Cofermentation von Silomais, Körnermais und Schweinegülle mit Glycerin (im Auftrag der Südsteirische Energie und Eiweißversorgung Reg. Gen.m.b.H (SEEG))

Glycerinzusatz erhöhte das spezifische Methanbildungsvermögen der Grundmischung in allen Fällen. Glycerinanteile von 3 bis 6 % zur Grundmischung zeigten beste Gäreigenschaften und höchste spezifische Methanerträge. Glycerinanteile über 6 % führten zu einer verzögerten Gärung. Als ideale Mischungsanteile können 3–6 % Glycerin zur Grundmischung empfohlen werden. Im Falle der Vergärung von reinem Glycerin wurde eine starke Schaumbildung beobachtet. Der Gärprozess verlief unstabil und es wurde eine starke Hemmung der Methanbildung während der ersten 10 Tage beobachtet (AMON ET AL. 2004b).

Die beschriebenen Untersuchungen demonstrieren, dass bereits umfangreiche Vorarbeiten zur Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen durchgeführt wurden. Das Methanenergiewertmodell wurde in einer ersten Entwicklungsstufe für Silomais- und Klee gras mischungen entwickelt. In der Praxis wird es, obwohl es erst vor kurzem entwickelt wurde, bereits umfangreich nachgefragt. Das MEWM kann mittel- und längerfristig zur Lösung wesentlicher derzeit bestehender Problembereiche der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen beitragen. Eine rationelle und ökologisch nachhaltige Biogaserzeugung aus Energiepflanzen muss aber weitere Energiepflanzen berücksichtigen. Deshalb findet die Weiterentwicklung des MEWM mit Sonnenblumen, Dauerwiesengras, Weizen und Triticale im vorliegenden Projekt statt. Langfristig soll das volle Spektrum der Energiepflanzen in das MEWM integriert werden, um für die verschiedenen Standorte in Österreich vielfältige Fruchtfolgen entwickeln zu können.

3 Ziele und Arbeitsschwerpunkte des Projekts

In Tabelle 3 werden die wichtigen Kernziele des Projekts, mit den jeweiligen Arbeitsschwerpunkten entlang der Biogaserzeugung- und -nutzung aufgelistet.

Tabelle 3. Projektziele und Darstellung der Arbeitsschwerpunkte mit Beschreibung der Frage- und Problemstellungen

| Ziel 1: Erzeugung von Energiepflanzen für einen hohen Methanertrag |
|---|
| <p>Arbeitsschwerpunkt 1.1: Qualität von Energiepflanzen (Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen, Triticale)</p> <p>Frage- und Problemstellung: Die Vergärung von Energiepflanzen läuft dann optimal ab, wenn die Nährstoffzusammensetzung dem Bedarf der Mikroorganismen im Fermenter entspricht. Wichtige Einflüsse auf die Nährstoffzusammensetzung sind: Pflanzenart und -sorte, Reifegrad, Erntezeitpunkt und Konservierung. Die Nährstoffzusammensetzung bestimmt maßgeblich gärtechnische Eigenschaften: Abbaugeschwindigkeit, intermediären Gärstoffwechsel, Säureproduktion, spezifisches Methanbildungsvermögen. Für potente Energiepflanzen sind Anbau- und Konservierungsempfehlungen zu entwickeln, die eine möglichst hohe Methanausbeute aus nachhaltigen Fruchtfolgesystemen gewährleisten.</p> |
| <p>Arbeitsschwerpunkt 1.2: Methanhektarertrag von Energiepflanzenarten und -sorten (Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen, Triticale)</p> <p>Frage- und Problemstellung: Die Wirtschaftlichkeit der Biogaserzeugung wird maßgeblich durch die Menge an Methan, die aus der Biomasse pro Hektar gebildet werden kann, bestimmt. Der Methanhektarertrag wird durch zwei meist gegenläufige Größen festgelegt: den Ertrag an organischer Trockensubstanz pro Hektar, der im Laufe der Vegetation der Pflanzenbestände meist zunimmt, und das spezifischen Methanbildungsvermögen der Gärrohstoffe. Dieses nimmt im Vegetationsverlauf in der Regel ab.</p> <p>Das Optimum beider Faktoren muss gefunden werden, um konkrete Empfehlungen zum optimalen Erntezeitpunkt und zu möglichen Methanhektarerträgen ableiten zu können. Kriterien zu standortspezifisch geeigneten Energiepflanzenarten und -sorten werden ermittelt.</p> |
| <p>Arbeitsschwerpunkt 1.3: Nachhaltige Fruchtfolgesysteme für den Energiepflanzenanbau</p> <p>Frage- und Problemstellung: Der Energiepflanzenanbau muss die Grundsätze einer nachhaltigen Fruchtfolge berücksichtigen, um dauerhaften Erfolg zu bringen. Die Erzeugung von Energiepflanzen ist nur in standortangepassten und ökologisch ausgewogenen Fruchtfolgesystemen sinnvoll. Entscheidend ist der Methanhektarertrag vollständiger Fruchtfolgesysteme, nicht der einzelner Fruchtarten. Fruchtfolgeglieder des Energiepflanzenanbaues sollen in bestehende Fruchtfolgesysteme als Haupt- und Zwischenfrüchte integriert werden. Die Intensität des Anbaus muss der Ertragskraft des Standortes entsprechen. Vorschläge für standortangepasste Fruchtfolgen, die auf die Wachstumsbedingungen in den österreichischen Regionen Bezug nehmen, werden erarbeitet.</p> |

Arbeitsschwerpunkt 1.4: Vorbehandlung der Energiepflanzen vor dem Einbringen in den Fermenter (Voransäuern, Dampfaufschluss, Mikrowellenbestrahlung)

Frage- und Problemstellung: Der Cellulose-Lignin-Komplex von Energiepflanzen kann die Verfügbarkeit von Nährstoffen der Gärrohstoffe ungünstig beeinflussen. Gerüstsubstanzen bestimmen die Abbaufähigkeit und die Abbaugeschwindigkeit von Gärrohstoffen. Durch Vorbehandlungsmethoden wie Voransäuern (Zitronensäure), Hitzebehandlung (Wasserdampf) und Mikrowellenbestrahlung kann unter Umständen ein Voraufschluss der Gerüstsubstanzen und eine Veränderung der Nährstoffzusammensetzung der Gärrohstoffe wie z.B. der Fettfraktion erreicht werden. Die Wirkungen der Vorbehandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute von Gärrohstoffen werden bei Nutzung von Wiesengras, Sonnenblumen, Weizen und Triticale ermittelt. Die diesbezügliche Eignung der verschiedenen Verfahren wird untersucht.

Arbeitsschwerpunkt 1.5: Substratspezifisch optimale hydraulische Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter

Frage- und Problemstellung: Um das Potenzial zur Methanbildung der Energiepflanzen weitgehend nutzen zu können, um den Fermenter richtig zu dimensionieren und um eine stabile Gärung ohne Geruchsbelastung zu erreichen, muss die optimale hydraulische Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter bekannt sein. Die optimale hydraulische Verweilzeit wird auf der Basis des Verlaufs der kumulierten spezifischen Methanerträge während der Gärung der Energiepflanzen ermittelt.

Ziel 2: Biogaserzeugung mit hoher Effizienz und Qualität

Arbeitsschwerpunkt 2.1: Sicherer Gärverlauf und hoher Gasertrag durch das Methanenergiewertmodell (MEWM)

Frage- und Problemstellung: Eine rationelle Biogaserzeugung mit hoher Gasqualität setzt eine bedarfsgerechte und vollwertige Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen voraus. Dies ist eine der wesentlichsten Voraussetzungen für einen sicheren Verlauf der Gärung und für das Vermeiden von Gärstörungen. Dafür muss das Methanbildungsvermögen einzelner Energiepflanzen in Abhängigkeit ihrer Inhaltsstoffe bekannt sein. Mit Hilfe des zu entwickelnden Methanenergiewertmodells (MEWM) soll das Methanbildungsvermögen von Mais, Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen und Triticale a priori berechnet werden können. So wird eine hohe spezifische Methanausbeute aus Energiepflanzen und ein hoher energetischer Wirkungsgrad bei der Transformation der Biomasseenergie in Methanenergie des Biogases erreicht.

Arbeitsschwerpunkt 2.2: Hohe Biogasqualität

Frage- und Problemstellung: Der Methangehalt bestimmt die verbrennungstechnischen Eigenschaften von Biogas. Schwefelwasserstoff im Biogas verursacht Korrosionsschäden im gesamten gasführenden System. Das Eiweiß-Energie-Verhältnis der Energiepflanzen kann den CH_4 - und H_2S -Gehalt im Biogas beeinflussen. Schwefelwasserstoff und Ammonium/Ammoniak können darüber hinaus die Gärbiologie behindern. Der Einfluss der Zusammensetzung von zehn Gärrohstoffmischungen aus eiweißreichem Wiesengras und energiereichem Mais und des Zusatzstoffes IPUS-zeo-lift-biokat zu den verschiedenen Gärrohstoffen: Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen und Triticale auf die Methanausbeute und die Biogasqualität (CH_4 -, H_2S - u. NH_3 - Gehalt) werden untersucht.

Arbeitsschwerpunkt 2.3: Leitfäden für eine optimierte Biogaserzeugung aus Energiepflanzen
Frage- und Problemstellung: Die Potenziale der Energiepflanzenvergärung können nur dann genutzt werden, wenn Leitfäden zur optimalen Biogaserzeugung erarbeitet und verbreitet werden. Die Leitfäden berücksichtigen wichtige Elemente der Verfahrenskette: Energiepflanzenanbau, Konservierung und Aufbereitung, Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen, Kalkulation der spezifischen Methanbildung und des Methanhektarertrages, Leistungsberechnung von Biogasanlagen und erforderliche Abbauprodukte der Energiepflanzen für eine angepasste Fermenterdimensionierung.

Arbeitsschwerpunkt 2.4: Leitfäden für eine effiziente Düngung mit dem Gärrückstand vergorener Energiepflanzen
Frage- und Problemstellung: Vergorene Energiepflanzen weisen hervorragende Düngungseigenschaften auf. Sie leisten somit nicht nur einen Beitrag zur nachhaltigen Energieerzeugung, sondern auch zum weitgehenden Schließen von Stoffkreisläufen. Ein umfassendes Konzept der Energiepflanzenutzung muss deshalb auch die Verwertung des Gärrückstandes beinhalten. Düngungspläne für ein flexibles und effizientes Düngemanagement werden entwickelt.

Ziel 3: Optimierte Biogasnutzung

Arbeitsschwerpunkt 3.1: Gasreinigung und -aufbereitung
Frage- und Problemstellung: Voraussetzung für eine breite Anwendung von Biogas ist die Anpassung der Gasqualität an den jeweiligen Nutzungsweg. Qualitätsanforderungen an das Biogas werden für die einzelnen Nutzenanwendungen (Brennstoffzellen, Erdgasnetz, konventionelle BHKW, Mobilität) aufgezeigt. Die Trocknung und Entschwefelung von Biogas ist bei allen Nutzungswegen notwendig. Eine Aufbereitung bis auf Erdgasqualität bedingt zusätzlich eine Methananreicherung. Für die Gasreinigung stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die sich in den Kosten, der Reinigungsleistung und der Reinigungssicherheit zum Teil wesentlich unterscheiden. Die erforderliche Biogasqualität für die unterschiedlichen Nutzungswege sowie die jeweils geeigneten Reinigungsverfahren gilt es zu ermitteln.

Arbeitsschwerpunkt 3.2: Gasnutzung
Frage- und Problemstellung: Biogas wird derzeit hauptsächlich in Verbrennungsmotoren genutzt. Weitere Nutzungswege stellen Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen und Stirlingmotoren sowie die alleinige thermische Nutzung in dafür geeigneten Brennern bzw. Heizkesseln dar. Auch der Einsatz von Biogas als Treibstoff zum Antrieb von Kraftfahrzeugen oder aber die Einspeisung in das Erdgasnetz sind Nutzungsoptionen. Die verschiedenen Nutzungswege werden dargestellt, Vor- und Nachteile sowie der Entwicklungsstand neuer Technologien werden herausgearbeitet.

Arbeitsschwerpunkt 3.3: Leitfäden für verschiedene Nutzungen des Biogases
Frage- und Problemstellung: Vorschläge über Anforderungen an die Biogasqualität für die verschiedenen Nutzenanwendungen und mögliche Aufbereitungsverfahren sollen aus den Ergebnissen der Literaturrecherche abgeleitet werden. Die Vorschläge können für Empfehlungen in Leitfäden für verschiedene Nutzungspfade des Biogases herangezogen werden.

Wesentlicher Kerninhalt des Projekts ist die Optimierung der Biogasproduktion aus Energiepflanzen. Dies beinhaltet die Bereiche:

- nachhaltige Erzeugung von Energiepflanzen, Energiepflanzenqualität und Fruchtfolgeempfehlungen für eine hohe Methanproduktion pro Flächeneinheit
- Aufbereitung und Behandlung der Energiepflanzen für eine optimale Gärung
- rationelle Fermentation mit hohen Energieausbeuten
- Biogasqualität für verschiedene Optionen der Nutzung (BHKW, Brennstoffzellen, Einspeisung in das Erdgasnetz)
- Dünger und Düngungsempfehlungen

4 Vorgehensweise, Methoden und Datenbearbeitung

4.1 Arbeitsablauf und -durchführung der Laborversuche

4.1.1 Erzeugung und Aufbereitung der Energiepflanzen

Abbildung 2 zeigt alle Standorte, auf denen für das vorliegende Projekt Energiepflanzen zur Optimierung der Biogaserzeugung angebaut und aus denen die Gärrohstoffproben erzeugt wurden. Neben den Standorten sind die Pflanzenarten der jeweiligen Standorte dargestellt.

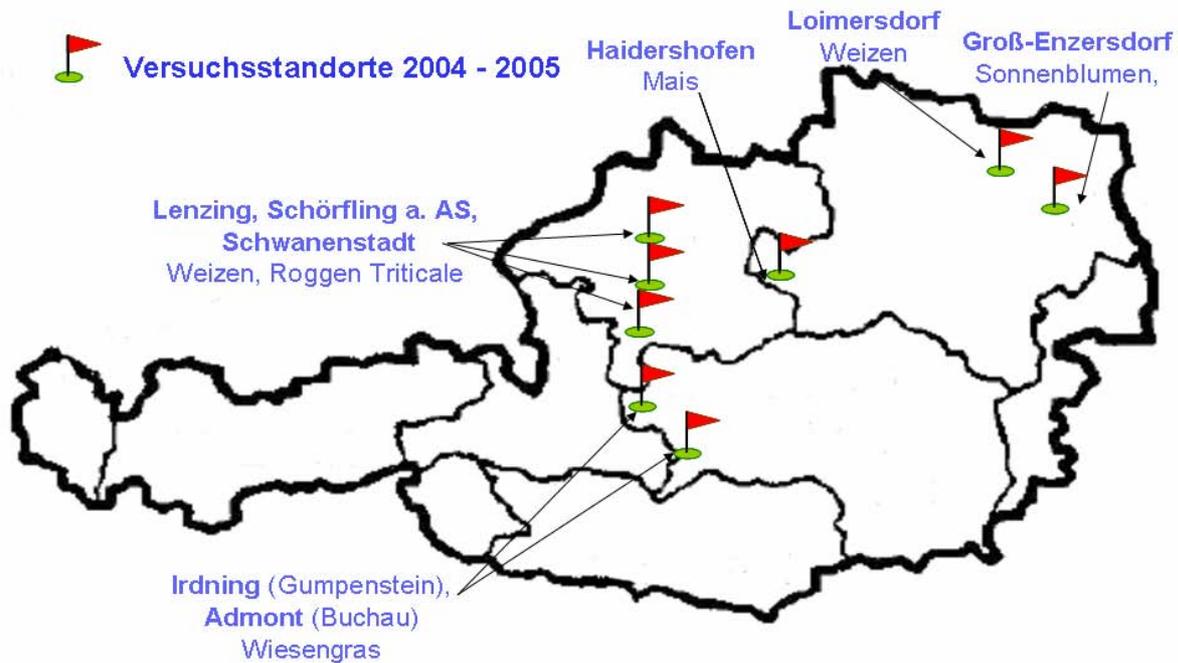


Abbildung 2: Standorte des Energiepflanzenanbaus zur Optimierung der Gärrohstoffqualität zur Methan-erzeugung.

Energiepflanzen wurden auf insgesamt 60 ha Versuchsfläche erzeugt. Die Wahl der Standorte und Auswahl der Energiepflanzen bilden repräsentative Anbau- und Ertragsverhältnisse der verschiedenen Regionen und Standorträume in Österreich ab.

Die Versuche zur Qualitätsdefinition der Gärrohstoffe umfassen Stoff- und Energiewechsel-messungen bei der anaeroben Vergärung von Energiepflanzen in Abhängigkeit von deren Nährstoffzusammensetzung und der Art der Vorbehandlung.

Folgende Energiepflanzenarten wurden eingesetzt:

- Sonnenblumen
- Dauerwiesenmischungen
- Getreide (Weizen, Triticale, zusätzlich im Projekt aufgenommen Roggen)
- Mais (zusätzlich im Projekt aufgenommen)

Von jeder Fruchtart wurden jeweils zwei marktgängige Sorten verwendet. Anbau und Ernte der Energiepflanzen erfolgten in Praxis-Feldversuchen der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raif-eisen Ware Austria AG (RWA), Pioneer Saaten GmbH und der Versuchswirtschaft Groß-

Enzersdorf der Universität für Bodenkultur Wien unter Mitwirkung und in enger Koordination mit der Projektleitung. Die Ernten der Bestände erfolgten im Verlauf der Vegetation auf allen Standorten und von allen Pflanzenarten zu jeweils vier bis sechs verschiedenen, aufeinanderfolgenden Erntezeitpunkten, beginnend mit früher Vegetationsentwicklung bis zur Vollreife der Pflanzen. Biomasseproben wurden jeweils zur Silagebereitung und späteren Inhaltsstoffanalyse gewonnen.

Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die sich ändernde Nährstoffzusammensetzung der Biomasse in den Gärrohstoffen repräsentiert ist. Von allen Sorten sämtlicher Praxisfeldversuche wurden zu jedem Erntezeitpunkt Ertragsmessungen durchgeführt. Die gewonnenen Proben wurden an die Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf gebracht, zerkleinert und einsiliert.

Zur Silierung wurde die Biomasse mit einem Scheibenradhäcksler auf 1 bis 3 cm Partikelgröße zerkleinert (Grobzerkleinerung, Abbildung 3a). Die zerkleinerte Biomasse wurde in Polyflaschen von 2 l Volumen gefüllt und mit einem Kolben per Hand verdichtet. Die randvoll befüllten Polyflaschen wurden verschlossen und mit Isolierband luftdicht gemacht. Der Siliervorgang dauerte 4–6 Wochen.

Für die Vergärung wurde die vorzerkleinerte Silage mit Schlagmühlen weiter intensiv zerkleinert (Feinzerkleinerung, Abbildung 3b). Der Partikeldurchmesser der verwendeten Silage betrug 0,5–3 mm. Alle im vorliegenden Projekt eingesetzten Energiepflanzenarten wurden in gleicher Weise aufbereitet und in den Gärversuchen im Labor verwendet.

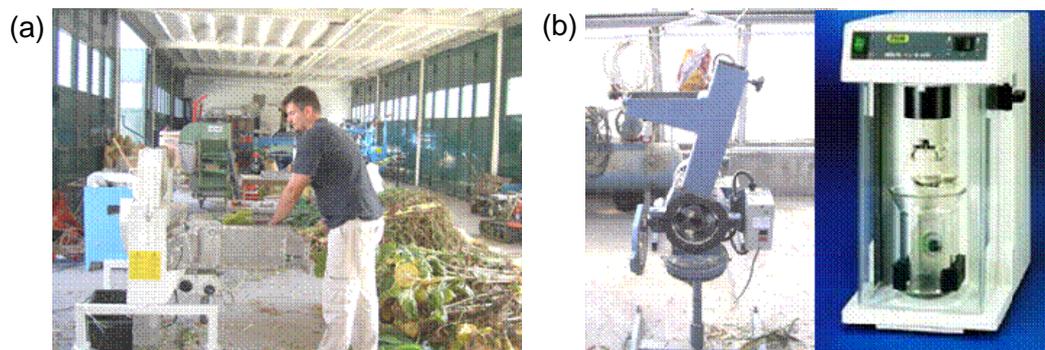


Abbildung 3. Grob- (a) und Feinzerkleinerung (b) der Energiepflanzen

Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Zerkleinerungs- und Aufbereitungsgrad des Silomaises, wie er als Gärrohstoff für Stoff- und Energiewechselmessungen der anaeroben Gärung im Labor eingesetzt wurde. Der Zerkleinerungsgrad der anderen Energiepflanzen war ähnlich dem des Silomaises.



Abbildung 4. Zerkleinerungsgrad von Silomais silage von Pflanzen verschiedener Vegetationsstadien

Die Untersuchungen des anaeroben Stoff- und Energiewechsels wurden hauptsächlich mit silierter Biomasse durchgeführt, weil dies das Standardkonservierungsverfahren für die Biogaserzeugung ist.

4.1.2 Methanenergiewertbestimmung und Analyseverfahren

Eine Vielzahl an Energiepflanzen eignet sich potenziell für die Vergärung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Der Methanertrag wird von der Sorte, dem Erntezeitpunkt und dem Aufbereitungs- und Konservierungsverfahren bestimmt. Diese Einflüsse müssen unter sonst gleichen und exakt definierten Rahmenbedingungen (Menge des Probenmaterials, Raumbelastung des Gärbehälters, Gärtemperatur, pH-Wert, Zusammensetzung des Impfsubstrates, Mischintervall und Mischintensität) ermittelt werden. Um repräsentative und miteinander vergleichbare Ergebnisse zum Methanbildungspotenzial verschiedener Energiepflanzen zu erhalten, die dem tatsächlich vorliegenden Methanbildungspotenzial entsprechen, ist es unbedingt erforderlich, die weiteren Einflussparameter konstant zu halten. Dies kann mit vertretbarem Aufwand nur im Labor erfolgen. Andernfalls ist damit zu rechnen, dass die genannten Systemeinflüsse die tatsächlich vorliegenden Methanbildungspotenziale von Gärgütern überlagern und somit Informationen über das eigentliche Methanbildungspotenzial und die Wirkung wichtiger verfahrenstechnischer Einflüsse wie Erntezeitpunkt und Aufbereitung nur mehr sehr eingeschränkt ableitbar sind. Laboruntersuchungen haben darüber hinaus den Vorteil, dass eine größere Zahl an Varianten in relativ kurzer Zeit untersucht werden kann. An praktischen Biogasanlagen müsste die Beschickung des Fermenters bei jeder zu untersuchenden Variante für den Zeitraum von mindestens zwei hydraulischen Verweilzeiten erfolgen, bevor das Methanbildungspotenzial des jeweiligen Substrats ermittelt werden könnte. Diese Wartezeit ist erforderlich, um Memoryeffekte auszuschließen, die dadurch zustande kommen, dass sich im Fermenter noch Gärgut der vorherigen Versuchsvariante befindet.

Im vorliegenden Projekt wurde die spezifische Methanproduktion im Labor mit Hilfe von Eudiometer-Messzellen (Abbildung 5) unter kontrollierten Gärbedingungen gemessen. Die Untersuchung erfolgte nach DIN-Norm 38414. Eine Eudiometer-Messapparatur umfasst sechs Messzellen (Abbildung 6). Jede Messzelle besteht aus einem Gassammelrohr, das mit Sperrflüssigkeit gefüllt ist. Dieses Rohr ist am oberen Ende mit einem Ausgleichsgefäß verbunden und steht am unteren Ende mit dem Gärbehälter in Verbindung, in dem sich das Probenmaterial und das Impfsubstrat befinden. Die Reaktionsgefäße wurden in einem Wasserbad temperiert (Gärtemperatur 40°C). Das in dem Gärbehälter gebildete Biogas verdrängte die Sperrflüssigkeit aus dem Gassammelrohr in das Ausgleichsgefäß. Die spezifische Biogasproduktion wurde an der Säulenskalierung des Gassammelrohres abgelesen und als Gasnormvolumen angegeben.



Abbildung 5. Eudiometer-Messapparatur nach DIN 38414

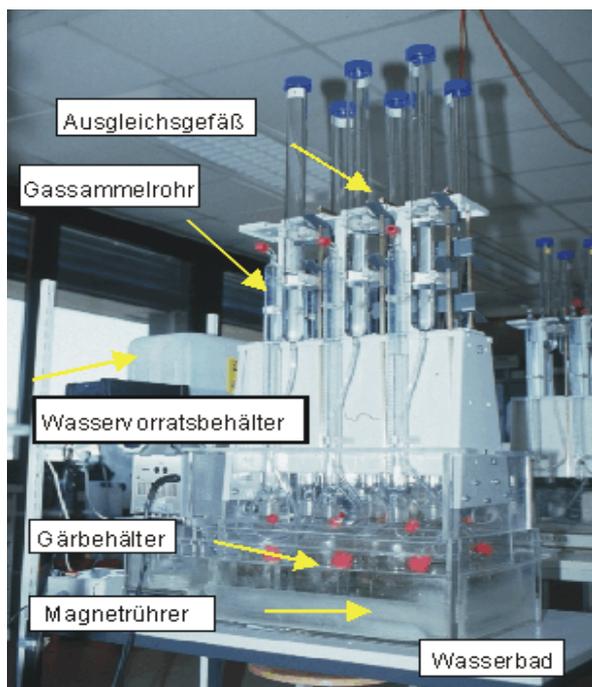


Abbildung 6. Eudiometer-Messapparatur nach DIN 38414

Als Impfsubstrat wurde aktives Gärgut aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt. Um zu verhindern, dass dieses mit Luftsauerstoff in Berührung kommt, wurden die leeren Gärbehälter mit Argon gefüllt und dann Probenmaterial und Impfsubstrat in die anaeroben Gärbehälter eingewogen (Abbildung 7).

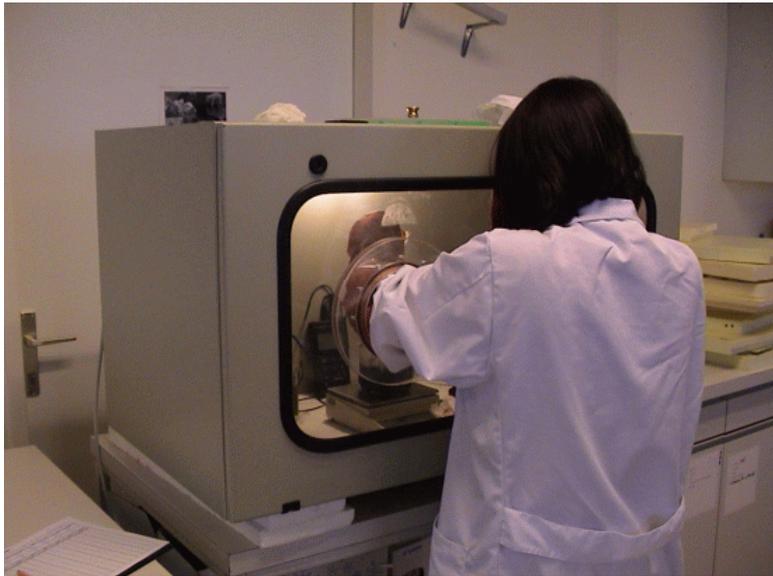


Abbildung 7. Einsetzen des Probenmaterials und des Impfsubstrats in die Gärbehälter im anaeroben Schrank

Zu Versuchsbeginn und im Verlauf der Gärung wurde der pH-Wert im Gärmedium kontrolliert. Der pH-Wert-Verlauf ist ein wichtiger Indikator für die Qualität und Stabilität der anaeroben Fermentation, ebenso wie das Fettsäurespektrum. Die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren wurde mittels Gaschromatographie bestimmt. Bei einem Fettsäurespektrum werden die Fettsäuren C1–C6 untersucht, d.h. Essigsäure (HAC), Propionsäure (PRO), Iso-Butter- (i-BUT), Butter- (n-BUT), Iso-Valerian- (i-VAL), Valerian- (n_VAL) und Capronsäure (CAP). Essig- und Propionsäuregehalt sind gute Indikatoren zur Beurteilung der Frage, ob der Gärprozess stabil verläuft oder nicht. Liegt der Gesamtsäurewert unter 1 g l^{-1} und der Anteil der Propionsäure unter 200 mg l^{-1} , so verläuft der Abbauvorgang optimal. Übersteigen die Werte 3 g l^{-1} bzw. bei der Propionsäure 300 mg l^{-1} , so kann eine Störung der anaeroben Gärung vorliegen.

Jede Variante verblieb etwa 40 Tage zur anaeroben Vergärung im Eudiometer. Im Verlauf der etwa 40-tägigen Gärung wurden die gebildete Biogasmenge täglich und die Zusammensetzung des Biogases alle 3 bis 4 Tage bestimmt. Die Methankonzentration des Biogases wurde mit dem Gas Data LMS NDIR Analysator (Genauigkeit der Messung: $\pm 1\text{--}3 \%$ vom Messwert) analysiert. Der Analysator wurde nach jeder 10-ten Messung mit Prüfgas (60% CH_4) kalibriert. Die quasi kontinuierlichen Methankonzentrationsmessungen mit dem NDIR Analysator wurden in regelmäßigen Intervallen mit einer gaschromatographischen Referenzmethode validiert.

Die H_2S -Konzentration im Biogas wurde ca. zweimal pro Woche mit Dräger Messröhrchen im Gasraum des Gärbehälters gemessen. Verwendete Dräger Messröhrchen: 1D mit Messbereich $1\text{--}200 \text{ ppm}$; 100 A mit Messbereich $100\text{--}200 \text{ ppm}$ und 0,2 %/A mit Messbereich $0,2\text{--}7 \text{ Vol. } \%$. Die Genauigkeit der Messung war $\pm 5\text{--}10 \%$ vom Messwert.

Die NH_3 -Konzentration des Biogases wurde ebenfalls mit Dräger-Messröhrchen bestimmt. Es wurde die Type 5/b (Messbereich $5\text{--}100 \text{ ppm}$) eingesetzt. Die Genauigkeit dieser Messung liegt bei $\pm 10\text{--}15 \%$ vom Messwert.

Aus den oben genannten Messgrößen konnte der Verlauf der Methangärung und die Stabilität des Gärprozesses beurteilt werden. Der Methanertrag der Energiepflanzenarten und -sorten wurde bestimmt. Die optimale hydraulische Verweilzeit in Abhängigkeit der Pflanzenart und

-sorte konnte ermittelt werden. Die Biogaszusammensetzung (Biogasqualität) erlaubte neben der Beurteilung des Energieertrages wesentliche Rückschlüsse auf den Zustand und den Verlauf der Gärung. Sie ist darüber hinaus ein empfindliches Indiz für Störungen der Methangärung.

Zu Beginn und teilweise am Ende jedes Versuchs wurden Inhaltsstoffanalysen der Gärstoffe durchgeführt. Folgende Inhaltsstoffe wurden analysiert: Trockenmasse (TM), Rohasche (XA), organische Trockensubstanz (oTS), Gesamtstickstoff (N_t), Ammoniumstickstoff (NH₄-N), Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX), Kohlenstoff (C_t), Zucker (XZ), Stärke (XS), Cellulose (Cel), Hemicellulose (H-Cel), Lignin (ADL) und Bruttoenergie (BE). Die Inhaltsstoffanalysen wurden nach gängigen Standardverfahren durchgeführt.

4.2 Berechnungsgrundlagen, Methanenergiewertmodell und Statistik

4.2.1 Berechnungsgrundlagen

1. Bestimmung des Biogasnormvolumens

Zuerst wurde für jede Eudiometerzelle das Normvolumen des in den einzelnen Zeitabschnitten entwickelten Biogases berechnet:

$$V_M = \frac{V_{neu} \times (P_{neu} - P_w) \times 273}{1013 \times T_{neu}} - \frac{V_{alt} \times (P_{alt} - P_w) \times 273}{1013 \times T_{alt}} \quad (1)$$

V_M = Biogasnormvolumen aus der Gärgutmischung [Nml]

V_{neu} = Volumen des Biogases bei der aktuellen Ablesung [ml]

V_{alt} = Volumen des Biogases bei der letzten Ablesung [ml]

P_{neu} = Luftdruck zur Zeit der aktuellen Ablesung [mbar]

P_{alt} = Luftdruck zur Zeit der letzten Ablesung [mbar]

P_w = Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes [mbar]

273 = Normtemperatur [273 K] 1013 = Normdruck [1013 mbar]

T_{neu} = Temperatur des Biogases bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der aktuellen Ablesung [K]

T_{alt} = Temperatur des Biogases bzw. des umgebenden Raumes zur Zeit der letzten Ablesung [K]

2. Bestimmung des Anteils der Biogasproduktion aus dem Inoculum

Der Inoculumanteil der Biogasproduktion aus der Mischung (Inoculum und Probe) wurde berechnet, indem die gemessene Biogasproduktion aus der Inoculumzelle mit dem anteiligen Verhältnis vom Inoculum in der Probezelle (Mischung aus Inoculum und Probe) multipliziert wurde.

$$V_I = V_x \times m_M / m_I \quad (2)$$

V_I = Anteilige Biogasproduktion des Inoculums an der Mischung [Nml]

V_x = Gasnormvolumen, das in der Impfmateriale-Zelle gebildet wurde [Nml]

m_M = Masse des in der Zelle mit der Mischung benutzten Inoculums [g]

m_I = Masse des in der Inoculum-Zelle benutzten Inoculums [g]

3. Berechnung der Biogasproduktion aus der Probe

Um die Biogasproduktion der Probe zu erhalten, wurde die anteilige Biogasproduktion des Inoculums von der Biogasproduktion der Gärgutmischung abgezogen.

$$V_{BG(P)} = V_M - V_I \quad (3)$$

$V_{BG(P)}$ = Biogasproduktion der Probe – korrigiertes Gasnormvolumen [Nml]

V_M = Biogasproduktion der Gärgutmischung [Nml]

V_I = Biogasproduktion des Inoculums [Nml]

4. Berechnung der spezifischen Biogasproduktion der Probe

Die in einem bestimmten Zeitabschnitt erfolgte Biogasproduktion der Probe wurde auf die organische Trockensubstanz (oTS) der Probe bezogen und in NI (kg oTS)⁻¹ angegeben.

$$V_{BG(S)} = \frac{V_{BG(P)} \times 10^4}{m \times TM \times oTS} \quad (4)$$

$V_{BG(S)}$ = spezifische Biogasproduktion [NI (kg oTS)⁻¹]

$V_{BG(P)}$ = korrigiertes Gasnormvolumen [Nml]

m = Masse der eingewogenen Probe [g]

TM = Trockenmassegehalt der Probe [% FM]

oTS = organischer Trockensubstanzgehalt der Probe [% TM]

5. Berechnung der kumulativen spezifischen Biogasproduktion der Probe

Die für die einzelnen Zeitabschnitte berechnete spezifische Biogasproduktion der Proben wurde kumulativ addiert. Zur graphischen Darstellung wurden diese Werte gegen die Versuchsdauer aufgetragen.

$$V_{BG(kum)} = \sum_{Tag=0}^{Tag=n} V_{BG(S)} \quad (5)$$

$V_{BG(kum)}$ = kumulierte spezifische Biogasproduktion der Probe [NI (kg oTS)⁻¹]

$V_{BG(S)}$ = spezifische Biogasproduktion der Probe [NI (kg oTS)⁻¹]

6. Berechnung der Methanproduktion aus der Probe

Die Bestimmung der Methanproduktion aus der Probe erfolgte anhand der Formeln (1) bis (3). Danach wurde die Biogasproduktion der Gärgutmischung mit der Methankonzentration des Biogases aus der Gärgutmischung multipliziert. Die Biogasproduktion des Inoculums wurde mit der Methankonzentration des Biogases aus dem Inoculum multipliziert. Von der Methanmenge der Mischung wurde die Methanmenge des Inoculums abgezogen. So erhält man die Methanproduktion aus der Probe.

$$V_{CH_4(P)} = \frac{V_M \times C_{CH_4(M)}}{100} - \frac{V_I \times C_{CH_4(I)}}{100} \quad (6)$$

$V_{CH_4(P)}$ = Methanproduktion der Probe [NI⁴ kg oTS⁻¹]

V_M = Biogasproduktion der Gärgutmischung [Nml]

V_I = Biogasproduktion des Inoculums [Nml]

$C_{CH_4(M)}$ = Methankonzentration im Biogas der Gärgutmischung [%]

$C_{CH_4(I)}$ = Methankonzentration im Biogas des Inoculums [%]

7. Berechnung der spezifischen Methanproduktion aus der Probe

Die in einem bestimmten Zeitabschnitt erfolgte Methanproduktion der Probe wird auf die organische Trockensubstanz (oTS) der Probe bezogen und in NI (kg oTS)⁻¹ angegeben.

$$V_{CH_4(S)} = \frac{V_{CH_4(P)} \times 10^4}{m \times TM \times oTS} \quad (7)$$

$V_{CH_4(S)}$ = spezifische Methanproduktion der Probe [NI (kg oTS)⁻¹]

$V_{CH_4(P)}$ = Methanproduktion der Probe [Nml]

m = Masse der eingewogenen Probe [g]

TM = Trockenmassegehalt der Probe [% FM]

oTS = organischer Trockensubstanzgehalt der Probe [% TM]

8. Kumulative spezifische Methanproduktion aus der Probe

Die für die einzelnen Zeitabschnitte berechnete spezifische Methanproduktion der Proben wurde kumulativ addiert. Zur graphischen Darstellung wurden diese Werte gegen die Versuchsdauer aufgetragen.

$$V_{CH_4(kum)} = \sum_{Tag=0}^{Tag=n} V_{CH_4(S)} \quad (8)$$

$V_{CH_4(kum)}$ = kumulierte spezifische Methanproduktion der Probe [NI (kg oTS)⁻¹]

$V_{CH_4(S)}$ = spezifische Methanproduktion der Probe [NI (kg oTS)⁻¹]

4.2.2 Qualitätsbewertung von Energiepflanzen mittels Methanenergiewertmodell

Für eine sichere Methangärung mit hohem energetischem Wirkungsgrad ist die richtige Versorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage mit Nährstoffen erforderlich. Eine rationelle und vollwertige Nährstoffversorgung gemäß der angestrebten energetischen Erzeugungsleistung von Biogasanlagen setzt voraus, dass das Methanbildungsvermögen – der Methanenergiewert – der Gärrohstoffe bekannt ist. Der Energiestoffwechsel der anaeroben Umsetzung soll kalkulierbar werden. Die Umwandlung der Bruttoenergie in den Energiepflanzen in Methanenergie des Biogases wird durch Messungen in Stoffwechselversuchen ermittelt. Das Methanenergiewertmodell (MEWM) berechnet das Methanbildungsvermögen von Biomass-

se aus den Inhaltsstoffen Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe (AMON ET AL. 2004a). Mit diesem neuen Bewertungssystem soll die energetische Bewertung der Vielzahl geeigneter Gärrohstoffe anhand ihrer Inhaltsstoffe möglich werden.

Für nahezu alle Pflanzenarten, die sich für die Biogaserzeugung eignen, liegen bereits umfangreiche Datenbanken zum Gehalt an Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF → NDF, ADF, ADL) und N-freien Extraktstoffen (XX) vor. Bislang werden die Daten zur Optimierung der Nährstoffversorgung von landwirtschaftlichen Nutztieren verwendet. Diese Datenbanken können in vollem Umfang auch zur Bestimmung des Methanenergiewerts bei der anaeroben Vergärung der Pflanzenbiomasse herangezogen werden. Darüber hinaus wird mit Hilfe eines neuen Methanenergiewertmodells eine exakte Berechnung der energetischen Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit der verfügbaren Biomasse möglich.

Milieubedingungen anaerober Stoffwechselfersuche können mit Hilfe kinetischer Modelle optimal gestaltet werden. Derzeit ist die Fähigkeit von Biomasserohstoffen zur Methanbildung nicht näher bekannt. In der Tierernährung wird die energetische Bewertung von Futtermitteln als Standardmethode bereits zur bedarfsgerechten Fütterung landwirtschaftlicher Nutztiere angewendet (KELLNER ET AL. 1984, KIRCHGESSNER 1992, MOE ET AL. 1987, NEHRING 1972, SCHIEMANN 1971, SCHNEIDER & FLATT 1975, VAN ES ET AL. 1980). Das mikrobielle Ökosystem im Pansen von Wiederkäuern ist der Ökologie des anaeroben Stoffwechsels in Biogasanlagen sehr ähnlich (MADIGAN ET AL. 2000). Es ist deshalb sinnvoll und erforderlich, die Methode der energetischen Bewertung von Futtermitteln zur Erzeugung von Milch und Fleisch etc. auch auf Energiepflanzen zur Methanerzeugung zu übertragen.

Grundlage für die energetische Bewertung der Gärrohstoffe ist ihre Wirkung zur Bildung von Methan bei der Verwendung von Mikroorganismenpopulationen aus Biogasanlagen mit flüssiger Vergärung in mesophilen und thermophilen Temperaturbereichen. Das Methanbildungsvermögen der verschiedenen Nährstoffe in den Gärrohstoffen wird mittels multipler Regressionsanalyse berechnet. Das Methanbildungsvermögen der Nährstoffe wird also nicht mit reinen Nährstoffen geprüft, sondern es wird festgestellt, welches tatsächliche Produktionsvermögen die einzelnen (Roh-)Nährstoffe aufweisen, wenn diese in Form eines natürlichen Gärrohstoffes den Mikroorganismen im Fermenter verabreicht werden. Der Stoffwechsel der Methangärung wird durch Zulage zu prüfender Gärrohstoffe zum Inoculum im Batch-System experimentell untersucht.

4.2.2.1 Bilanzstufen des anaeroben Energiewechsels

Der Energieumsatz von Biomasse wird im Stoffwechselfersuch bei anaerober Gärung im Batch-Experiment gemessen. Für die Energiewechselformung wird die in Abbildung 8 dargestellte Gliederung der Bilanzstufen verwendet.

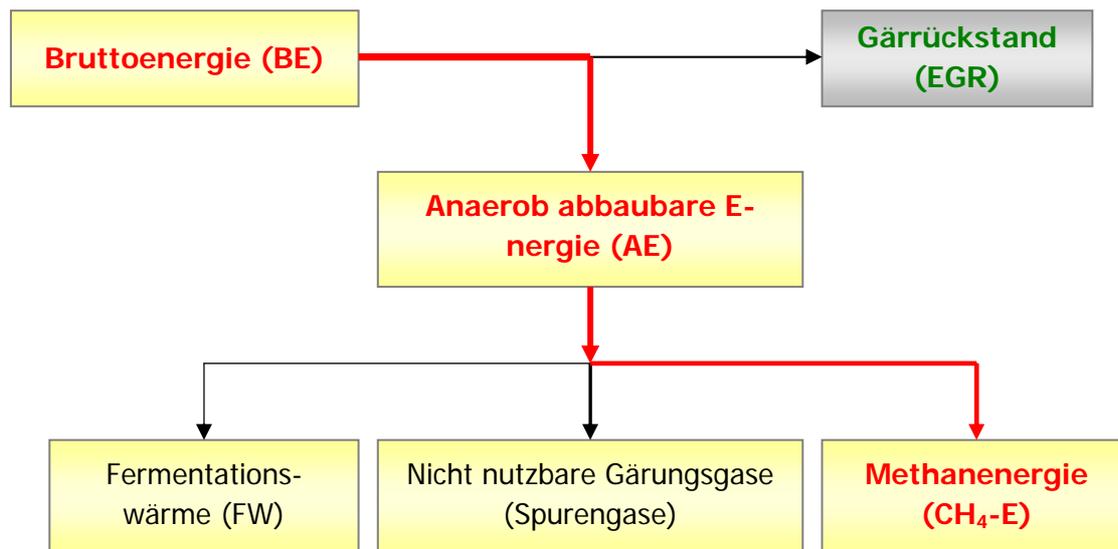


Abbildung 8. Schema des Energiestoffwechsels

Die mit dem Gärgut zugeführte Energie wird im Fermenter für die Erhaltung der Lebens- und Stoffwechselfunktionen der Mikroorganismen und für die Erzeugung der gasförmigen Verbindungen, vorwiegend CH₄ und CO₂, verwendet. Hierbei treten an verschiedenen Stellen Verluste auf, die im Gesamtstoffwechselfersuch erfasst werden können. Die Bruttoenergie (BE) ist die in den Gärrohstoffen enthaltene chemische Energie. Sie wird im Bombenkalorimeter durch Verbrennung als freigesetzte Wärme erfasst. Der je nach Zusammensetzung der Gärrohstoffe im Fermenter mikrobiell nicht abbaubare Anteil der organischen Substanz und der in Bakterienbiomasse fixierte Energieanteil – ca. 7 % des Energiegehalts der abbaubaren Biomasse (EDELMAAN 2001) – verbleiben im Gärrückstand, der aus dem Fermenter wieder ausgetragen wird. Zieht man diese im Gärrückstand enthaltene Energie – sie wird ebenfalls durch Verbrennung des Gärrückstandes im Bombenkalorimeter bestimmt – von der Bruttoenergie ab, so erhält man die anaerob abbaubare Energie (DE). Beim Gärungsvorgang entsteht in geringerem Umfang auch Wärme (Fermentationswärme). Nach EDELMAAN (2001) haben die Bakterien beim anaeroben Abbau organischer Substanz weniger als 5 % der Energie zu ihrer freien Verfügung. Beim anaeroben Abbau wird deshalb nur sehr wenig Wärme frei. Die Fermentationswärme (FW) kann theoretisch berechnet werden, indem man von der Bruttoenergie des Gärgutes die Energie des nicht abgebauten Gärrückstandes (EGR) und die Methanenergie des Biogases abzieht (CH₄-E). Der Energiegehalt der Spurengase (H⁺, NH₃, org. Säuren) wird nicht gesondert erfasst, weil diese Gase im Vergleich zum Methan nur in Spuren (< 300–1000 ppm) im Biogas enthalten sind. Er ist deshalb rechnerisch in der Fermentationswärme enthalten. Wenn man die Fermentationswärme (FW) von der abbaubaren Energie (DE) abzieht, erhält man die Höchstmenge an Energie, die dem System zur Bildung von Methan zur Verfügung steht. Die im Biogas enthaltene Methanmenge wird im Stoffwechselfersuch direkt gemessen. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich das Schema des Energiewechsels der anaeroben Gärung wie folgt:

Methanenergie (Biogas) = Bruttoenergie (Gärgut) – Energie (Gärrückstand) – Fermentationswärme

(CH₄-E) = (BE) - (EGR) - (FW)

Entsprechend dem Schema des Energiewechsels lassen sich Quotienten der Energieausnutzung beschreiben.

(1) Der Wirkungsgrad der Methanbildung (η) ergibt sich aus:

$$\eta = \text{Methanenergie im Biogas (CH}_4\text{-E)} / \text{Bruttoenergie (BE) im Gärgut}$$

(2) Die Abbaubarkeit der Energie d_E ergibt sich aus:

$$d_E = \text{Abbaubare Energie (DE)} / \text{Bruttoenergie (BE)}$$

4.2.2.2 Charakteristika des Methanenergiewertmodells

Das neue Bewertungssystem baut auf folgenden Prämissen auf:

1. Stoffwechselexperimente zum Gesamtprozess der anaeroben Zersetzung organischer Substanz in Methan werden im Labor durchgeführt. Als Inoculum wird Material aus Biogasanlagen mit Energiepflanzenvergärung verwendet, die nach dem neuesten Stand der Technik gebaut und betrieben werden (ÖKL-Biogasanlagen).
2. Im Stoffwechselexperiment wird der transformierbare Anteil der Bruttoenergie des Gärgutes in Methanenergie des Biogases gemessen.
3. Das Bewertungssystem beruht auf der Verwendung der Rohnährstoffe von Gärrohstoffen. Der „Methanenergiewert“ eines Gärrohstoffes (MEW) wird nach einer multiplen Regressionsgleichung aus den Rohnährstoffgehalten der Gärrohstoffe: Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freien Extraktstoffen (XX) (% TM) berechnet und in $\text{l CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}$ angegeben.

$$\begin{aligned} \text{MEW [l CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}] &= x_1 \times \text{XP [\% TM]} \\ &+ x_2 \times \text{XL [\% TM]} \\ &+ x_3 \times \text{XF [\% TM]} \\ &+ x_4 \times \text{XX [\% TM]} \end{aligned}$$

4. Die Bruttoenergie (BE) und die Energie im Gärrückstand (EGR) werden im Bombenkalorimeter bestimmt.
5. Der Wirkungsgrad für die Methanbildung (η) ergibt sich aus dem Quotienten Methanenergie im Biogas/Bruttoenergie des Gärgutes. Dem unmittelbaren Zusammenhang zwischen Methanerzeugung und dafür erforderlichem Bruttoenergiebedarf wird dadurch Rechnung getragen.
6. Der gärgutspezifische Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad der Methanbildung (η) und dem Methanenergiewert (MEW) von Gärgütern wird dargestellt. Damit kann bei Kenntnis des Methanenergiewerts für verschiedene Rohstoffe direkt auf den energetischen Wirkungsgrad bei der Methangärung verschiedener Gärgüter geschlossen werden.
7. Es wird geprüft, inwieweit der C-Transferfaktor (Kohlenstoff im Biogas/Kohlenstoff im Gärgut) vom Methanenergiewert (MEW) des Gärgutes abhängt.
8. Es wird geprüft, inwieweit der Schwefelwasserstoff- und Methangehalt im Biogas vom Eiweiß-Energieverhältnis der Energiepflanzen und von den Inhaltsstoffen: Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF) und N-freie Extraktstoffe (XX) abhängt.

Im Methanenergiewertmodell erfolgt die Zusammenstellung einer Gärgutmischung durch anteilige Addition der Methanenergiewerte der einzelnen Gärrohstoffkomponenten. Die für die Kalkulation von Gärrohstoffmischungen vorteilhafte Bewertung von Einzelgärgütern ermöglicht die Kalkulation des Methanenergiewerts (MEW) der Gesamtgärrohstoffmischung. Das Methanenergiewertmodell ermöglicht durch die Verwendung der Summe der Rohnährstoffe die optimale Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen. Für eine angestrebte Leistung der Biogasanlage kann der erforderliche Nährstoffbedarf berechnet werden. Daraus ergeben sich erstmals grundlegende neue Möglichkeiten, von der Seite der Gärrohstoffe den anaeroben Zersetzungsprozess der organischen Substanz in praktischen Biogasanlagen zu optimieren und die Methanproduktionskapazität von Gärgütern in der Praxis maximal auszunutzen.

4.2.3 Statistik

Es erfolgte eine deskriptive Statistik. In den Ergebnistabellen sind der Mittelwert und die Standardabweichung angegeben. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 9. Das Modell zur Berechnung des Methanenergiewerts der Energiepflanzenarten wurde mit Hilfe einer multiplen, linearen Regressionsanalyse (Methode: Einschluss) ermittelt. Die Inhaltsstoffe der Gärgüter wurden als Regressorvariablen verwendet, die spezifische Methanausbeute ist die Zielvariable. Die Güte der Regressionsmodelle wurde durch den Regressionskoeffizienten „b“ und das Bestimmtheitsmaß „r²“ sowie durch das Signifikanzniveau (p) des Gesamtmodells angegeben. Die Normalverteilung der Residuen wurde grafisch geprüft. Die Residuen wurden mit dem Durbin-Watson-Test auf Autokorrelation getestet.

4.3 Grundlagen zur Ermittlung nachhaltiger Fruchtfolgesysteme

4.3.1 Untersuchungsregionen

Das Ziel der Auswahl der Untersuchungsregionen war es, drei österreichische Gebiete auszuwählen, welche stellvertretend für andere Regionen stehen. Zur Gebietsabgrenzung wurde auf die in der EU eingeführten NUTS-III-Regionen zurückgegriffen. Als Kriterien dienen:

- **Landwirtschaftliche Betriebsform:** Diese sollte für die österreichische Landwirtschaft von großer Bedeutung sein, d.h. Futterbaubetriebe und Marktfruchtbetriebe, mit und ohne Viehhaltung, Schweine oder Rinderhaltung.
- **Landnutzung und klimatische Differenzierung:** Diese sollte sich unterscheiden: Grünland- und Ackerbaubetriebe (Mostviertel-Eisenwurzen) versus reine Ackerbaubetriebe (Weinviertel).
- **Zugang zu Daten:** als Datengrundlage dienen INVEKOS-Daten sowie regionenspezifische Modellbetriebe aus vorausgegangenen Studien (LINDENTHAL ET AL. 2004; KRATOCHVIL 2003 und DARNHOFER ET AL. 2003).

Um möglichst einen hohen Anteil an potenziell anbaubaren Kulturarten Österreichs einzubeziehen, wurden Regionen aus einem Trockengebiet, aus einem Übergangsbereich und aus den nördlichen Randalpen ausgewählt. Bei den Untersuchungsregionen handelt es sich um:

- I. Trockengebiet: NUTS III-Region Weinviertel,

II. Übergangsgebiet: NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen, Teil NORD

III. Nördliche Randalpen: NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen, Teil SÜD

Die NUTS III-Region Weinviertel beinhaltet Teile der Bezirke Gänserndorf, Mistelbach und Hollabrunn. Die wesentlichen Siedlungszentren sind die beiden Bezirkshauptstädte Mistelbach und Hollabrunn, sowie Retz, Laa an der Thaya, Poysdorf und Zistersdorf.

Die Region Mostviertel-Eisenwurzen wurde in Nord und Süd aufgeteilt, da diese Gebiete unterschiedliche klimatische Bereiche repräsentieren (Tabelle 4). Die Region im Norden ist ein typisches Ackerbaugebiet mit Rinder- und Schweinehaltung, während im Süden das Grünland mit Rinderhaltung (keine Schweinebetriebe) dominiert.

Die NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen umfasst die Stadt Waidhofen/Ybbs sowie die politischen Bezirke Amstetten, Melk und Scheibbs. Wobei die Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD aus folgenden Bezirken bzw. Gemeinde besteht: der gesamte Bezirk Scheibbs und der südliche Teil des Bezirks Amstetten mit den Gemeinden Waidhofen an der Ybbs, Ybbsitz, Opponitz, St. Georgen an der Reith und Hollenstein an der Ybbs.

Die Jahresniederschlagsmenge nahm in der Reihung Weinviertel, Mostviertel-Eisenwurzen NORD und Mostviertel-Eisenwurzen SÜD über das Zweifache zu. Im Gegenzug dazu sank die Jahreswärmesumme. In der Region Weinviertel war die Jahresmitteltemperatur um durchschnittlich 3°C höher als in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD.

Tabelle 4: Klimadaten der Untersuchungsregionen

| <i>NUTS III-Region</i> | <i>NS/Jahr in mm*</i> | <i>Jahreswärmesumme**</i> | <i>K-Index (Feuchtebilanz) Klassen**</i> | <i>Jahresmitteltemperatur in ° C*</i> |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|--|---------------------------------------|
| Weinviertel | Bis 600 | 3050–3970 | Schwach semi arid bis semi arid | 8–10 |
| Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 800–1500 | 2600–3599 | Mäßig humid bis schwach humid | 6–10 |
| Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | 1200–2000 | 2150–2599 | Stark bis mäßig humid | 4–8 |

Legende: NS = Niederschläge

*: ZAMG (2001); **: Zollner (2000)

In den drei unterschiedlichen Untersuchungsregionen wurden für verschiedene Betriebstypen praxisrelevante und pflanzenbaulich konsistente Fruchtfolgen zur Biogasproduktion entwickelt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Standorträume und deren Betriebstypen

| Untersuchungsregionen | AB/GL | Ohne Tierhaltung | | Mit Tierhaltung | | | |
|--|-------|------------------|------|--|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | Bio | Konv | Bio | | Konv | |
| I. Trockengebiet: NUTS III-Region: Weinviertel | AB | 2 FF | 2 FF | – | | – | |
| II. Übergangsbereich: NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | AB/GL | 1 FF | 1 FF | 1 FF Schweinehaltung (Zuchtsauen) | 1 FF Rinderhaltung (Milchkuh) | 1 FF Schweinehaltung (Mastschweine) | 1 FF Rinderhaltung (Milchkuh) |
| III. Nördliche Randalpen: NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | GL/AB | – | – | 1 FF Rinderhaltung (Milch-Mutterkuh) | | 1 FF Rinderhaltung (Milchkuh) | |

Legende: AB = Ackerbau; GL = Grünland; FF = Fruchtfolge; Bio = biologisch; Konv = konventionell
 - = Betriebstyp ist für diese Region nicht typisch bzw. nicht vorhanden

4.3.2 Datengrundlagen

Als Datengrundlagen für die Modellfruchtfolgen konventioneller und biologischer Betriebe dienen:

- Anteile der Ackerkulturen an der Ackerfläche (EDER 2005)
- Kulturartenverteilung und Modellbetriebe vorausgehender Untersuchungen (KRATOCHVIL 2003, LINDENTHAL ET AL. 2004, EDER und DARNHOFER 2003)
- Hinweise von Beratern zu regionstypischen Modellfruchtfolgen
- Ertragsschätzungen vorausgehender Untersuchungen (KRATOCHVIL 2003, LINDENTHAL ET AL. 2004)
- Erträge aus BMLFUW (2002a und b) für den biologischen und konventionellen Landbau
- Stroherträge wurden nach dem üblichen Korn-/Strohverhältnis errechnet (BMLFUW 2000b, FREYER ET AL. 2005)

Die nach den INVEKOS-Daten 2004 (EDER 2005) vorkommenden Kulturarten wurden in einem ersten Schritt anhand ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres Methangasertrages getrennt für biologischen und konventionellen Landbau zusammengestellt (Tabelle 6 und

Tabelle 7). Nicht weiter verfolgt wurden solche Kulturarten, die als Sonderkulturen einzustufen sind. Kulturarten, die sich im Anbau und Wirtschaftlichkeit ähnelten, wurden gemeinsam betrachtet.

Tabelle 6: Methanhektarerträge im biologischen Landbau je Kulturart und Ertragsniveau

| Kulturart | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | oTS in dt ha ⁻¹ | | | ***Faktor Methanertrag in Nm ³ dt ⁻¹ | Methanerträge in Nm ³ ha ⁻¹ | | |
|--|-------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------|--|--|-------------|-------------|
| | Gering | Hoch | ME | Gering | Hoch | ME | | Gering | Hoch | ME |
| Winterweizen* | 32,0 | 48,0 | 40,0 | 27,3 | 40,9 | 34,1 | 37,1 | 1012 | 1518 | 1265 |
| Weizenstroh**** | 35,2 | 52,8 | 44,0 | 28,5 | 42,7 | 35,6 | 18,9 | 537 | 806 | 672 |
| Triticale* | 36,0 | 54,0 | 45,0 | 30,7 | 46,0 | 38,4 | 37,1 | 1139 | 1708 | 1423 |
| Roggen* | 30,0 | 45,0 | 38,0 | 25,6 | 38,4 | 32,0 | 37,1 | 949 | 1423 | 1186 |
| Roggenstroh**** | 42,0 | 63,0 | 53,2 | 33,2 | 49,8 | 41,9 | 40,9 | 1358 | 2037 | 1714 |
| Dinkel* | 28,0 | 42,0 | 35,0 | 23,9 | 35,8 | 29,8 | 37,1 | 886 | 1329 | 1107 |
| Wintergerste* | 32,0 | 48,0 | 40,0 | 27,3 | 40,9 | 34,1 | 37,1 | 1012 | 1518 | 1265 |
| Sommergerste* | 28,0 | 42,0 | 35,0 | 23,9 | 35,8 | 29,8 | 37,1 | 886 | 1329 | 1107 |
| Hafer* | 28,0 | 42,0 | 35,0 | 23,9 | 35,8 | 29,8 | 36,5 | 871 | 1307 | 1089 |
| Getreide-GPS | 68,4 | 102,6 | 85,5 | 25,7 | 38,6 | 32,1 | 27,0 | 695 | 1043 | 869 |
| Silomais*/***** | 101,0 | 151,0 | 126,0 | 88,9 | 132,9 | 110,9 | 39,0 | 3467 | 5183 | 4325 |
| Rübenblatt siliert**** | 320,0 | 400,0 | 360,0 | 46,1 | 57,6 | 51,8 | 32,4 | 1493 | 1866 | 1680 |
| Sonnenblume* | 16,0 | 24,0 | 20,0 | 6,3 | 9,5 | 7,9 | 35,0 | 222 | 332 | 277 |
| Sonnenblumen-GPS | 32,0 | 48,0 | 40,0 | 12,7 | 19,0 | 15,8 | 27,0 | 342 | 513 | 427 |
| Luzerne-Grüngut** | 80,0 | 150,0 | 100,0 | 63,0 | 117,0 | 90,0 | 43,2 | 3110 | 5832 | 3888 |
| Klee**/***** | 70,0 | 120,0 | 95,0 | 63,7 | 109,2 | 86,5 | 35,0 | 2230 | 3822 | 3026 |
| Kleegras Heu* | 90,0 | 130,0 | 110,0 | 81,0 | 117,0 | 99,0 | 27,9 | 2264 | 3270 | 2767 |
| Zwischenfrüchte (Kleegrassilage)***** | 25,0 | 35,0 | 30,0 | 22,5 | 31,5 | 27,0 | 33,5 | 754 | 1055 | 904 |

Legende: GPS = Ganzpflanzensilage, ME = Mittleres Ertragsniveau, oTS = organische Trockensubstanz, Nm³ = Norm-Kubikmeter

* BMLFUW (2002a)

** FREYER ET AL. (2005)

*** KTBL (2005) und AMON ET AL. (2003)

**** Erträge errechnet nach üblichem Korn/Strohverhältnis bzw. Blatt/Rübenverhältnis

***** Trockenmasse

***** In der Literatur liegen nur Methanhektarerträge für Kleegras vor, daher wurde dieser Wert bei allen Zwischenfrüchten angenommen

Tabelle 7: Methanhektarerträge im konventionellen Landbau je Kulturart und Ertragsniveau

| Kulturart | *Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | oTS in dt ha ⁻¹ | | | **Faktor Methanertrag in Nm ³ dt ⁻¹ | Methanerträge in Nm ³ ha ⁻¹ | | |
|--------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|--------------|--------------|---|---|-------------|-------------|
| | Gering | Hoch | ME | Gering | Hoch | ME | | Gering | Hoch | ME |
| Winterweizen* | 35,0 | 70,0 | 53,0 | 29,8 | 59,7 | 44,8 | 37,1 | 1107 | 2214 | 1661 |
| Weizenstroh*** | 38,5 | 77,0 | 57,8 | 30,5 | 47,5 | 45,7 | 18,9 | 575 | 896 | 862 |
| Triticale* | 30,0 | 60,0 | 45,0 | 25,6 | 65,7 | 38,4 | 37,1 | 949 | 2436 | 1423 |
| Roggen* | 25,0 | 55,0 | 40,0 | 21,3 | 46,9 | 34,1 | 37,1 | 791 | 1740 | 1265 |
| Roggenstroh*** | 35,0 | 77,0 | 56,0 | 27,7 | 60,9 | 44,3 | 40,9 | 1133 | 2491 | 1812 |
| Wintergerste* | 30,0 | 70,0 | 50,0 | 25,6 | 59,7 | 42,6 | 37,1 | 949 | 2214 | 1582 |
| Sommergerste* | 30,0 | 60,0 | 45,0 | 25,6 | 51,2 | 38,4 | 37,1 | 949 | 1898 | 1423 |
| Hafer* | 25,0 | 50,0 | 38,0 | 21,3 | 42,6 | 32,0 | 36,5 | 778 | 1556 | 1167 |
| Getreide-GPS | 67,5 | 135,0 | 101,3 | 25,4 | 50,8 | 38,1 | 27,0 | 686 | 1373 | 1029 |
| Silomais **** | 105,0 | 180,0 | 143,0 | 92,4 | 158,4 | 125,4 | 39,0 | 3604 | 6178 | 4891 |
| Rübenblatt siliert*** | 320,0 | 520,0 | 420,0 | 46,1 | 74,9 | 60,5 | 32,4 | 1493 | 2426 | 1960 |
| Sonnenblume* | 17,5 | 45,0 | 31,0 | 6,9 | 17,8 | 12,4 | 35,0 | 242 | 623 | 433 |
| Sonnenblumen-GPS | 35,0 | 90,0 | 63,0 | 13,8 | 35,6 | 24,7 | 27,0 | 374 | 961 | 668 |
| Luzerne-Grüngut | 52,0 | 147,0 | 100,0 | 40,2 | 132,3 | 89,6 | 43,2 | 1739 | 5715 | 3869 |
| Klee **** | 81,0 | 209,0 | 145,0 | 63,4 | 163,6 | 113,5 | 35,0 | 2219 | 5725 | 3972 |
| Kleegras Heu **** | 90,0 | 150,0 | 120,0 | 81,0 | 135,0 | 108,0 | 27,9 | 2264 | 3773 | 3018 |

Legende: GPS = Ganzpflanzensilage, ME = Mittleres Ertragsniveau, oTS = organische Trockensubstanz, Nm³ = Norm-Kubikmeter

* BMLFUW (2002b)

** KTBL (2005) und AMON et al. (2003)

*** Erträge errechnet nach üblichen Korn/Strohverhältnis bzw. Blatt/Rübenverhältnis

**** Trockenmasse

Die Ertragsniveaus in Tabelle 6 sind gemäss den Standarddeckungsbeiträgen im biologischen Landbau (BMLFUW 2002a) und konventionellen Landbau Ostösterreichs (BMLFUW 2002b). Alle Erträge laut BMLFUW (2002a und b) sind Felderträge ohne Abzüge von Verlusten. Die Stammdaten für die Gasproduktion (Methanertrag in Nm³ dt⁻¹) wurden aus KTBL (2005) und AMON ET AL. (2003) entnommen. Aufgrund unterschiedlicher Biomasseerträge unterscheiden sich die Methanhektarerträge (Nm³ ha⁻¹) zwischen biologischem und konventionellem Landbau. Die Methanhektarerträge beziehen sich immer auf die organische Trockensubstanz (oTS). Die Werte zur Berechnung der oTS stammen aus der Literatur (KTBL 2005 oder DLG 1997). Bei fehlenden Tabellenwerten wurde ein Wert von Kulturarten mit ähnlicher Zusammensetzung verwendet. Kulturen mit besonders hohen Methanhektarerträgen sind fett gedruckt (Silomais, Zuckerrübe, Luzerne, Klee und Kleegras), wobei die Zuckerrübe als Gaslieferant ausscheidet, da zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschätzbar ist, wie sich die Verschmutzung der Rübenköpfe

auf die Biogasqualität auswirkt bzw. ob eine Gaserzeugung bei einer Reinigung der Zuckerrübe ökonomisch rentabel ist (WALLA 2005, mündliche Mitteilung).

Aufbauend auf diesen Daten wurden drei verschiedene Kategorien von Modellfruchtfolgen formuliert:

1. Regionstypische Modellfruchtfolgen
2. Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen
3. Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau mit maximalem Methanhektarerträgen

Orientierung für die Definition der Fruchtfolgen gaben minimale sowie maximale Anteile an Kulturarten, die insbesondere im ökologischen Landbau nach den Gesichtspunkten Bodenfruchtbarkeit, Beikraut, Nitrat und Pflanzenschutz einzuhalten sind. Darüber hinaus erfolgte eine Bewertung der Fruchtfolgen nach anbautechnischen Gesichtspunkten. Für alle Untersuchungsgebiete sowie Anbauintensitäten wurden entlang der Fruchtfolgen für die ausgewählten Kulturarten Leistungsprofile mittels Naturalertrag, Deckungsbeitrag und Methangasertrag beschrieben.

4.3.3 Betriebstypen

Trockengebiet – Region Weinviertel

In der Untersuchungsregion Weinviertel befanden sich 6586 Betriebe (INVEKOS 1999, zit. aus DARNHOFER ET AL. 2003). 92 % davon sind Marktfruchtbetriebe und Dauerkulturbetriebe (Weinbau). 71 Betriebe (1 %) wirtschafteten 1999 nach den Richtlinien des biologischen Landbaus. Im Durchschnitt bewirtschaftete ein biologischer Marktfruchtbetrieb 47 ha und ein konventioneller Marktfruchtbetrieb 35 ha (Tabelle 8).

Bei einer biologischen Bewirtschaftung ergeben sich Verschiebungen in der Flächennutzung. Die Modelle basieren auf folgenden Überlegungen:

Um eine nachhaltige Fruchtfolge und eine Ertragssicherheit zu gewährleisten, wird auf der Ackerfläche nur max. 60 % Getreide angebaut (Wintergetreide max. 50 %, Sommergetreide max. 20 %. Weizen max. 35 %). Leguminosen machen mind. 30 % der Ackerfläche aus, wobei die Obergrenze bei Körnerleguminosen bei 20 % liegt. Hartweizen wird nicht angebaut, dafür stehen Dinkel, Triticale und Luzerne als zusätzliche Kulturen zur Verfügung. Es wird kein Raps (hoher Stickstoffbedarf, hoher Schädlingsbefall) und keine Futterrüben (hoher Unkrautbesatz) angebaut (LINDENTHAL ET AL. 2004).

Tabelle 8: Konventionelle und biologische Betriebstypen in Untersuchungsregion I: Weinviertel

| Betriebsform | Anteil Betriebe je Kategorie in % | | LN je Betrieb in ha | | Ackerfläche je Betrieb in ha | | Weingärten je Betrieb in ha | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------|---------------------|-------|------------------------------|------|-----------------------------|------|
| | Bio | Konv | Bio | Konv | Bio | Konv | Bio | Konv |
| Marktfruchtbetriebe | 49,5 | 45,9 | 46,7 | 35,3 | 45,6 | 34,2 | 0,6 | 0,8 |
| Veredelungsbetriebe | – | 1,4 | – | 34,1 | – | 33,5 | – | 0,4 |
| Dauerkulturbetriebe | 38,0 | 45,8 | 14,1 | 6,8 | 8,3 | 4,1 | 5,3 | 2,5 |
| Landwirtschaftliche Gemischtbetriebe | 4,2 | 2,7 | 6,8 | 39,0 | 6,0 | 35,5 | 0,2 | 3,0 |
| Kombinationsbetriebe | 4,2 | 0,8 | 123,3 | 101,3 | 123,3 | 95,5 | 0,0 | 3,0 |
| Alle | | | 36,5 | 21,8 | 33,1 | 19,9 | 2,3 | 1,6 |

Quellen: INVEKOS-Daten aus dem Jahr 1999 und Daten der Agrarstrukturerhebung 1999, zit. aus LINDENTHAL ET AL. (2004)

Die konventionell wirtschaftenden Betriebe wurden von LINDENTHAL ET AL. (2004) einem Produktionsschwerpunkt zugeordnet. Betriebe aus dem INVEKOS-Datensatz 1999 (1368 oder 27 %), die nicht alle Kriterien für eine Zuordnung erfüllten, waren bei diesem zweiten Analyseschritt ausgenommen. Es handelte sich dabei einerseits um kleine Betriebe (weniger als 5 ha Ackerfläche und weniger als 0,3 ha Weingärten), andererseits um Betriebe, die nur wenige Tiere halten, bzw. um Betriebe mit gemischter Tierhaltung. Diese bewirtschaften ca. 18 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche. In den Modellrechnungen sind diese Betriebe respektive Flächen nicht einbezogen.

Aus den ermittelten konventionellen Betriebstypen wurden drei ausgewählt, die sich hinsichtlich der Produktionsausrichtung wesentlich unterschieden (Tabelle 9). Spezialisierte Ackerbaubetriebe mit verstärktem Hackfruchtanbau (Ab1) stehen Betrieben mit relativ hohem Zuckerrübenanteil (Ab2) und kleineren, meist im Nebenerwerb extensiv geführten Betrieben mit hohem Anteil an Ölsaaten (Ab3) gegenüber (DARNHOFER ET AL. 2003).

Tabelle 9: Ausgewählte konventionelle Betriebstypen im Weinviertel

| Betriebs-typ | Anzahl der Betriebe | Acker-fläche in ha | Hauptfrüchte in % der Ackerfläche* | | | | | | Ölsaaten |
|------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|---------------|----------|
| | | | Sommer-getreide | Winter-getreide | Zucker-rüben | Kartof-feln | Feld-gemüse | Körner-erbsen | |
| Ackerbaubetriebe | | | | | | | | | |
| Ab1 | 274 | 40,0 | 24,1 | 37,1 | 11,0 | 8,7 | 2,9 | 2,7 | 3,9 |
| Ab2 | 418 | 38,7 | 26,6 | 35,8 | 12,9 | – | – | 1,5 | 8,9 |
| Ab3 | 468 | 29,8 | 26,6 | 36,3 | – | – | – | 1,4 | 21,3 |

*: Nicht angeführt ist Körnermais, Ab = Ackerbaubetrieb

Quelle: LINDENTHAL ET AL. (2004: S. 60), DARNHOFER ET AL. (2003), EDER und DARNHOFER (2003)

Gesamte Region Mostviertel-Eisenwurzen (NORD und SÜD)

Nach der INVECOS Datenbank aus dem Jahr 1998 (zit. aus KRATOCHVIL 2003), dominierten in der Region Mostviertel-Eisenwurzen Grünlandbetriebe. Drei Viertel der Betriebe verfügten über Ackerfläche. Spezialkulturen und Weingartenfläche waren von geringer Bedeutung (Tabelle 10).

Tabelle 10: Konventionelle und biologische Betriebstypen über die gesamte Region Mostviertel-Eisenwurzen

| <i>Merkmal</i> | <i>Einheit</i> | <i>gesamt</i> | <i>konv</i> | <i>bio</i> |
|-------------------------------------|----------------|---------------|-------------|------------|
| LN gesamt | ha | 159.618 | 138.326 | 21.292 |
| davon Ackerfläche | % | 46,9 | 52,2 | 10,6 |
| davon Grünland | % | 52,8 | 47,6 | 89,2 |
| davon Spezialkulturen | % | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| davon Weingartenfläche | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Landwirtschaftliche Betriebe | Anzahl | 10.415 | 9225 | 1190 |
| davon Betriebe mit Ackerfläche | % | 73,7 | 79,0 | 29,6 |
| davon Betriebe mit Grünland | % | 97,5 | 97,2 | 99,9 |
| davon Betriebe mit Spezialkulturen | % | 0,5 | 0,5 | 0,2 |
| davon Betriebe mit Weingartenfläche | % | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| LN je Betrieb | ha | 15,4 | 15,0 | 17,9 |
| Ackerfläche je Betrieb | ha | 9,8 | 10,0 | 6,4 |
| Grünland je Betrieb | ha | 8,3 | 7,4 | 16,0 |

Quelle: INVEKOS 1998, zit. aus KRATOCHVIL (2003: S. 24)

Grundlage für die betriebswirtschaftliche Bewertung stellten Betriebstypen und -cluster dar, die die „typischen“ landwirtschaftlichen Betriebe der Region abbildeten. Ausgangsbasis für die Betriebstypen und -clusterbildung bilden die 10415 im INVEKOS-Datensatz (INVEKOS 1998) erfassten landwirtschaftlichen Betriebe der NUTS III-Region Mostviertel-Eisenwurzen. Das integrierte Verwaltungs- und Kontrollsystem basiert auf der EU-VO 3508/93 und dient der Abwicklung und Kontrolle der EU-Förderungsmaßnahmen. In dieses System sind alle flächen- und tierbestandsbezogenen Beihilfenregelungen eingebunden. Nach der Unterteilung der Datenbasis in die Gruppen biologisch bzw. konventionell wirtschaftende Betriebe wurden diese innerhalb der beiden Gruppen in Abhängigkeit ihres Produktionsschwerpunkts in Betriebstypen unterteilt (bezeichnet als Milchkuh-, Milch-Mutterkuh-, Mutterkuh-, Mastrinder-, Zuchtsauen-, Schweinemast-, kombinierte Zucht-Schweinemast-, Legehennen-, Masthühner-, Marktfruchtbetriebe). Innerhalb der Betriebstypen wurde mittels Clusteranalyse in Betriebe mit unterschiedlichem Intensitätsniveau differenziert. Danach wurden Mittelwerte der bestimmenden Strukturvariablen in den einzelnen Clustern (z.B. durchschnittliche Anbaufläche von Winterweizen) gebildet. Anschließend wurden diese Mittelwerte mit Bezirksbauernkammersekretären und Berater in der Region diskutiert. Auf dieser Basis gestaltete KRATOCHVIL (2003) verschiedene Betriebsmodelle, aus denen für diese Untersuchung folgende verwendet wurden (Tabelle 11 und Tabelle 12).

Tabelle 11: Ausgewählte biologische Betriebsmodelle in der Region Mostviertel-Eisenwurzen (II. und III.)

| Region | Betriebsmodell | LN in ha | AF in % d. LN | Hauptfrüchte in % der Ackerfläche | | | | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------|---------------|-----------------------------------|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-------|
| | | | | WW | WR | TR | WG | SG | DI | KM | HA | KL | KA | AF | ST/BE |
| NORD | Ab int | 13,0 | 100,0 | 16,7 | 3,6 | – | 16,7 | 16,7 | 3,6 | – | – | 16,1 | 7,6 | 10,0 | 9,0 |
| | ZuS ext | 15,0 | 80,0 | 18,2 | – | – | 10,7 | 12,4 | 2,4 | 16,5 | 4,1 | 24,1 | – | 1,6 | 10,0 |
| | Mikuh int | 19,0 | 42,1 | – | – | 32,5 | – | 22,5 | – | – | – | – | – | 45,0 | – |
| SÜD | MiMukuh ext | 18,0 | 17,0 | 10,0 | – | 26,7 | – | 26,7 | – | – | – | – | – | 40,0 | – |

Legende: ZuS: Betriebe mit Zuchtschweinen, Ab: Viehlose Ackerbaubetriebe; Mikuh: Milchkuh; MiMukuh: Milch-Mutterkuh, int: intensiv, ext: extensiv; WW: Winterweizen, WR: Winterroggen, TR: Triticale, WG: Wintergerste, SG: Sommergerste, DI: Dinkel, KM: Körnermais, HA: Hafer, KL: Körnerleguminosen, KA: Kartoffel, AF: Ackerfutter, ST/BE: Stilllegung/Begrünung

Quelle: KRATOCHVIL (2003)

Tabelle 12: Ausgewählte konventionelle Betriebsmodelle in der Region Mostviertel-Eisenwurzen (II. und III.)

| Region | Betriebsmodell | LN in ha | AF in % d. LN | Hauptfrüchte in % der Ackerfläche | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------|---------------|-----------------------------------|------|------|------|-------|------|-----|------|-------|
| | | | | WW | TR | SG | SM | KM | RA | ZR | AF | ST/BE |
| NORD | Ab int | 13,0 | 100,0 | 46,9 | – | 13,1 | – | 15,4 | 8,4 | 7,0 | – | 9,2 |
| | MaS ext | 18,0 | 83,0 | 6,6 | 25,3 | 9,3 | – | 34,0* | 15,3 | – | – | 10,0 |
| | Mikuh int | 19,0 | 42,1 | – | 50,0 | 11,3 | 13,7 | – | – | – | 25,0 | – |
| SÜD | Mikuh ext | 15,0 | 40,0 | – | 23,3 | 3,3 | 11,6 | – | – | – | 63,3 | – |

Legende: MaS: Betriebe mit Mastschweinen, Ab: Viehlose Ackerbaubetriebe; Mikuh: Milchkuh; int: intensiv, ext: extensiv; WW: Winterweizen, TR: Triticale, SG: Sommergerste, SM: Silomais, KM: Körnermais, RA: Raps, ZR: Zuckerrübe, AF: Ackerfutter, ST/BE: Stilllegung/Begrünung

*Maiskornsilage

Quelle: KRATOCHVIL (2003)

In einem weiteren Schritt wurden INVEKOS-Daten von 2004 (EDER 2005) nach der statistischen Kennzahl sortiert und in NORD- und SÜD-REGION aufgeteilt, da diese Regionen die gewünschten Standorträume (Ackerbaugebiete ohne/mit Tierhaltung – mit Schwerpunkt Schweine und Rinder und Gebiete ausschließlich mit Tierhaltung – mit Schwerpunkt Rinder) abdeckten. Danach konnten die mittleren Kulturartenanteile der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD und SÜD ermittelt werden, welche auch eine Grundlage zur Erstellung regionsspezifischer Fruchtfolgen darstellte.

4.3.4 Fruchtfolgen und Kulturartenauswahl

Vorgaben für die Erstellung nachhaltiger Fruchtfolgen im biologischen Landbau

In Anlehnung an LINDENTHAL ET AL. (2004) sind spezielle Vorgaben in Bezug auf die Kulturanteile bei der Erstellung biologischer Fruchtfolgen einzuhalten.

Tabelle 13: Vorgaben für Kulturanteile biologischer Fruchtfolgen

| Kultur | % in der Fruchtfolge | % innerhalb des Fruchtfolgeglieds |
|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Getreide | max. 70 | – |
| Winterweizen | max. 35 | – |
| Körnermais | max. 25 | – |
| Winterweizen u. Körnermais | max. 50 | – |
| Feldfutter | min. 20 | – |
| Körnerleguminosen | max. 25 | – |
| Kartoffeln | max. 20 | – |
| Hackfrucht | max. 30 | – |
| Kartoffel | – | max. 66 |
| Ölkürbis | – | max. 66 |
| Silomais | – | max. 66 |
| Zwischenfruchtanbau | min. 33 | – |
| Kleegras | max. 33 | – |
| bei 1,0 GV ha ⁻¹ | max. 40* | – |
| bei 1.5 GV ha ⁻¹ | max. 50* | – |
| Luzernegras | max. 29** | – |

Legende: *SCHNECK (2002), **FREYER ET AL. (2005)

Entwicklung regionstypischer biologischer und konventioneller Modellfruchtfolgen

Da sich die INVEKOS-Daten 2004 (EDER 2005) der Region Weinviertel, ausschließlich auf Ackerbaubetriebe beziehen, spiegeln die mittleren Kulturanteile sehr gut die Praxis wider. Zur Erstellung der regionstypischen Modellfruchtfolgen in der Region Weinviertel wurden außerdem Betriebstypen von EDER und DARNHOFER (2003) herangezogen. Bei den mittleren Kulturanteilen der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD waren aber sowohl reine Ackerbaubetriebe als auch Betriebe mit Schweinehaltung und Betriebe mit Rinderhaltung enthalten. Diese verschiedenen Betriebstypen bauten unterschiedliche Kulturen an. Bei der Erstellung der regionstypischen Modellfruchtfolgen für die Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD wurde hauptsächlich von Betriebsmodellen aus KRATOCHVIL (2003) ausgegangen, weil hier nach Betriebstypen differenzierte Kulturartenverhältnisse angegeben sind. Ähnliches gilt für die Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD, denn auch hier beziehen sich die mittleren Kulturanteile auf mehrere Betriebstypen. In der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD konnte aber davon ausgegangen werden, dass es sich bei einem Großteil der Betriebe um Betriebe mit Rinderhaltung handelte. Zur Erstellung der regionstypischen Modellfruchtfolgen der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD wurden die extensiven Betriebstypen von KRATOCHVIL (2003) herangezogen.

Es wurden je Standort (biologisch und konventionell) mindestens zwei typische Fruchtfolgen kreiert, wobei in der Praxis tendenziell die dargestellte Schlagteilung wenig praktiziert wurde. Um der Praxis näher zu kommen, kann man die Schlagteilung aufheben und jeder Fruchtfolge (beispielhaft) wieder ca. zwei typische Varianten zuordnen.

4.3.4.1 Trockengebiet – Region Weinviertel

Biologische Betriebe

Die Kulturartenverteilung in Betrieben, die nach den Richtlinien des biologischen Landbaus wirtschafteten, setzt sich laut INVEKOS 2004 folgendermaßen zusammen: Als die wichtigsten Kulturarten gelten Winterweizen, Sommergerste, Körnererbse sowie das Feldfutter (Luzerne, Klee gras, Brache...). Diese Kulturarten nehmen etwa 65 % der Ackerfläche ein (Tabelle 14). Danach folgt eine zweite Gruppe an Kulturarten mit fast 24 % der Anbaufläche, deren wichtigste Vertreter Triticale, Roggen, Dinkel, Körnermais, Ölkürbis sowie Kartoffel darstellen. Alle anderen Kulturarten nehmen einen Flächenanteil von zum Teil deutlich unter 1 % der Anbaufläche ein. Die Biobetriebe verfügen durchschnittlich über 49,6 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 92,3 % (45,8 ha) beträgt. In Tabelle 14 sind nur die Kulturarten biologischer Marktfruchtbetriebe im Weinviertel dargestellt.

Tabelle 14: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe im Weinviertel

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|------------------------------------|-------|----------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW** (auch: Hartweizen) | 8,12 | 17,73 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 44,0 | 48,4 | 46,2 | 658 | 767 | 713 | 124 | 151 | 137 |
| SG*/** (Hafer, SW) | 6,93 | 15,13 | 35,0 | 38,5 | 37,0 | 35,0 | 38,5 | 37,0 | 372 | 450 | 411 | 70 | 91 | 81 |
| Triticale*/** , (Roggen) | 3,92 | 8,56 | 45,0 | 49,0 | 47,0 | 58,5 | 63,7 | 61,1 | 390 | 469 | 430 | 212 | 234 | 228 |
| Dinkel | 1,65 | 3,60 | 35,0 | 38,5 | 37,0 | 45,5 | 50,1 | 48,1 | 914 | 1059 | 987 | 133 | 160 | 147 |
| WG* | 0,14 | 0,31 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 489 | 578 | 534 | 148 | 177 | 162 |
| Körnermais* | 2,68 | 5,85 | 55,0 | 60,5 | 57,8 | 55,0 | 60,5 | 57,8 | 591 | 702 | 647 | - | - | - |
| Silomais***** | 0,07 | 0,15 | - | - | - | 101,0 | 113,0 | 107,0 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 1,12 | 2,45 | 210,0 | 231,0 | 221,0 | - | - | - | 3420 | 3997 | 3709 | - | - | - |
| Zuckerrübe (LR A)**** | 0,52 | 1,14 | 400,0 | 500,0 | 450,0 | 320,0 | 400,0 | 360,0 | 1418 | 1944 | 1681 | - | - | - |
| Körnererbse | 4,47 | 9,76 | 25,0 | 27,5 | 26,3 | 25,0 | 27,5 | 26,3 | 37 | 91 | 64 | - | - | - |
| Sojabohne | 0,37 | 0,81 | 17,5 | 19,3 | 18,0 | 42,0 | 24,5 | 33,3 | 493 | 595 | 544 | - | - | - |
| Ackerbohne | 0,16 | 0,35 | 30,0 | 33,0 | 32,0 | 45,0 | 49,5 | 47,3 | 272 | 339 | 306 | - | - | - |
| Ölkürbis | 1,76 | 3,84 | 4,5 | 5,0 | 4,7 | - | - | - | 1267 | 1468 | 1368 | - | - | - |
| Sonnenblume | 0,26 | 0,57 | 20,0 | 22,0 | 21,0 | 70,0 | 77,0 | 73,5 | 216 | 285 | 251 | - | - | - |
| LUZ**/***** (KG u. Brachen) | 10,42 | 22,28 | - | - | - | 70,0 | 110,0 | 85,0 | -161 | -205 | -183 | - | - | - |

Legende: WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, SW = Sommerweizen; WG = Wintergerste, LR A = Lieferrecht A laut, LUZ = Luzerne, KG = Klee gras, MW = Mittelwert, HP = Hauptprodukt (Korn, Rübe, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

*Futterware, **DB für fett markierte Kulturart (höherer Flächenanteil innerhalb der zusammengefassten Kulturen)

alle Erträge aus BMLFUW (2002a) außer KG: Freyer et al. (2005: S. 26), * BMLFUW (2002b: S. 84),

*****Trockenmasseerträge

Konventionelle Betriebe

Die Kulturartenverteilung der konventionellen Betriebe setzte sich laut INVEKOS 2004 wie folgt zusammen: Als die wichtigsten Kulturarten gelten Winterweizen und Sommergerste. Diese Kulturarten nahmen etwa 59 % der Ackerfläche ein (Tabelle 15). Danach folgte eine zweite Gruppe an Kulturarten mit etwa 34 % der Anbaufläche, deren wichtigste Vertreter Feldfutter (Luzerne, Klee gras, Brache), Zuckerrübe, Sonnenblume, Körnermais, Körnererbse und der Winterraps darstellten. Alle anderen Kulturarten nahmen einen Flächenanteil von 0,5 bis 1,5 % der Anbaufläche ein, oder lagen deutlich darunter (alle Kulturen unter 0,1 % wurden nicht dargestellt). Dinkel und andere Körnerleguminosen (außer Körnererbse) fehlten im Gegensatz zu den biologischen Betrieben fast gänzlich. Die konventionellen Betriebe verfügen durchschnittlich über 36,4 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 93,2 % (34,0 ha) beträgt.

Tabelle 15: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe im Weinviertel

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|--|-------|----------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|------|------|--------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW **, Hartweizen | 10,95 | 32,25 | 60,0 | 65,0 | 62,5 | 66,0 | 71,5 | 68,8 | 87 | 114 | 101 | 146 | 170 | 158 |
| SG */**, Hafer, SW | 9,12 | 26,86 | 47,5 | 52,5 | 50,0 | 47,5 | 52,5 | 50,0 | -16 | 22 | 3 | 65 | 87 | 76 |
| Triticale */**, Roggen | 0,45 | 1,33 | 50,0 | 55,0 | 52,5 | 65,0 | 71,5 | 68,3 | -12 | 20 | 4 | 141 | 170 | 156 |
| WG* | 0,18 | 0,53 | 60,0 | 65,0 | 62,5 | 60,0 | 65,0 | 62,5 | 53 | 68 | 61 | 172 | 198 | 185 |
| Körner- mais)*/**** | 1,47 | 4,33 | 80,0 | 85,0 | 82,5 | 80,0 | 85,0 | 82,5 | -222 | -210 | -216 | - | - | - |
| Silomais**** | 0,19 | 0,56 | - | - | - | 110 | 120 | 115 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 0,49 | 1,44 | 275,0 | 300 | 287,5 | - | - | - | 467 | 644 | 556 | - | - | - |
| Zuckerrübe | 2,27 | 6,69 | 600,0 | 650 | 625,0 | 480 | 520 | 500 | 2191 | 2454 | 2323 | - | - | - |
| KE | 1,05 | 3,09 | 40,0 | 45,0 | 42,5 | 40,0 | 45,0 | 42,5 | -40 | 11 | 15 | - | - | - |
| Sojabohne | 0,04 | 0,12 | 30,0 | 32,5 | 31,3 | 42,0 | 45,5 | 43,8 | -99 | -68 | -84 | - | - | - |
| Winterraps | 1,3 | 3,83 | 30,0 | 35,0 | 33,0 | 63,0 | 73,5 | 66,8 | 34 | 103 | 69 | - | - | - |
| Ölkürbis | 0,22 | 0,65 | 7,0 | 8,0 | 7,5 | - | - | - | 649 | 830 | 740 | - | - | - |
| Sonnenblume | 1,84 | 5,42 | 35,0 | 40,0 | 37,5 | 122 | 140 | 131 | 131 | 229 | 180 | - | - | - |
| LUZ */****, KG u. Bra- chen | 3,65 | 10,75 | - | - | - | 70,0 | 110 | 85,0 | - | - | - | - | - | - |

Legende: WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, SW = Sommerweizen; WG = Wintergerste, KE = Körnererbse, LUZ = Luzerne, KG = Klee gras, MW = Mittelwert, HP = Hauptprodukt (Korn, Rübe, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

*Futterware, **DB für fett markierte Kulturart (höherer Flächenanteil), ***alle Erträge aus BMLFUW (2002b)

****Trockenmasseerträge

4.3.4.2 Übergangsgebiet – Mostviertel-Eisenwurzten NORD

Biologische Betriebe

Die Kulturartenverteilung der biologischen Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzten NORD, setzte sich laut INVEKOS 2004 folgendermaßen zusammen: Als wichtigste Kulturart galt Kleegras. Diese Kulturart allein nahm etwa 36 % der Ackerfläche ein (Tabelle 16). Danach folgte eine zweite Gruppe an vielen Kulturarten mit über 52 % der Anbaufläche, wie z.B. Triticale, Winterweizen und -gerste, Dinkel, Mais, Körnerleguminosen und Silomais.

Tabelle 16: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzten NORD

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|-----------------------|------|----------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW | 0,87 | 9,46 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 44,0 | 48,4 | 46,2 | 658 | 767 | 713 | 124 | 150 | 137 |
| Hafer*/**, SG, SW | 0,65 | 7,07 | 31,5 | 35,0 | 33,0 | 31,5 | 35,0 | 33,0 | 164 | 225 | 195 | 87 | 112 | 99 |
| Triticale*/**, Roggen | 1,05 | 11,41 | 40,5 | 45,0 | 43,0 | 52,7 | 58,5 | 55,9 | 311 | 390 | 351 | 177 | 212 | 196 |
| Dinkel | 0,55 | 5,98 | 31,5 | 35,0 | 33,0 | 41,0 | 45,5 | 43,0 | 770 | 914 | 842 | 181 | 217 | 199 |
| WG* | 0,46 | 5,00 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 40,0 | 44,0 | 42,0 | 489 | 578 | 534 | 148 | 177 | 162 |
| Körnermais*/**** | 0,42 | 4,57 | 55,0 | 60,5 | 58,0 | 55,0 | 60,5 | 57,8 | 591 | 702 | 647 | - | - | - |
| Silomais**** | 0,35 | 3,80 | - | - | - | 126,0 | 151,0 | 139,0 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 0,06 | 0,65 | 189,0 | 210,0 | 200,0 | - | - | - | 2843 | 3420 | 3132 | - | - | - |
| KE | 0,24 | 2,61 | 25,0 | 27,5 | 26,0 | 25,0 | 27,5 | 26,3 | 37 | 91 | 64 | - | - | - |
| AB**, Sojabohne, LU | 0,23 | 2,50 | 24,0 | 27,0 | 26,0 | 36,0 | 40,5 | 38,3 | 137 | 204 | 171 | - | - | - |
| Ölkürbis | 0,14 | 1,52 | 4,1 | 4,5 | 4 | - | - | - | 1066 | 1267 | 1167 | - | - | - |
| Sonnenblume | 0,05 | 0,54 | 18,0 | 20,0 | 19,0 | 63,0 | 70,0 | 66,5 | 147 | 216 | 182 | - | - | - |
| KG**/****, AW u. LUZ | 3,32 | 36,09 | - | - | - | 110,0 | 120,0 | 115,0 | - | - | - | - | - | - |

Legende: WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, SW = Sommerweizen; WG = Wintergerste, KE = Körnererbse, , KG = Kleegras, AW = Ackerwiesen, LUZ = Luzerne, MW = Mittelwert, HP = Hauptprodukt (Korn, Rübe, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

*Futterware, **DB für fett markierte Kulturart (höherer Flächenanteil), ***alle Erträge aus BMLFUW (2002a) außer KG: Freyer et al. (2005: S. 26), ****Trockenmasseerträge

Die biologischen Betriebe der Region Mostviertel-Eisenwurzten NORD verfügten durchschnittlich über 18,7 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 49,0 % (9,2 ha) betrug.

Konventionelle Betriebe

Die Kulturartenverteilung der konventionellen Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzten NORD setzte sich laut INVEKOS 2004 folgendermaßen zusammen: Als die wichtigsten Kulturarten galten Körnermais, Feldfutter (Kleegras, Ackerwiesen, Luzerne), Winterweizen, Wintergerste sowie Silomais. Diese Kulturarten nahmen über 80 % der Ackerfläche ein (Tabelle 17). Danach folgte eine zweite Gruppe an Kulturarten mit etwa 14 % der Anbaufläche, deren wichtigsten Vertreter Sommergerste, Triticale, Körnererbse und Zuckerrübe darstellten.

Tabelle 17: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|-----------------------|------|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW | 1,99 | 16,28 | 55,0 | 65,0 | 60,0 | 60,5 | 71,5 | 66,0 | 63 | 125 | 94 | 122 | 170 | 146 |
| SG**/**, Hafer, SW | 0,66 | 5,40 | 45,0 | 47,5 | 46,0 | 45,0 | 47,5 | 46,0 | -34 | -16 | -25 | 93 | 107 | 100 |
| Triticale*/**, Roggen | 0,49 | 4,01 | 52,5 | 60,0 | 56,0 | 68,3 | 78,0 | 72,8 | 6 | 64 | 35 | 156 | 198 | 175 |
| WG* | 1,46 | 11,95 | 55,0 | 60,0 | 58,0 | 55,0 | 60,0 | 58,0 | 26 | 53 | 40 | 146 | 172 | 159 |
| Körnermais*/**** | 2,29 | 18,74 | 70,0 | 72,5 | 71,3 | 70,0 | 72,5 | 71,3 | -263 | -253 | -258 | - | - | - |
| Silomais**** | 1,86 | 15,22 | - | - | - | 150,0 | 180,0 | 165,0 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 0,02 | 0,16 | 225,0 | 275,0 | 250,0 | - | - | - | 112 | 467 | 289 | - | - | - |
| Zuckerrübe (LR A) | 0,28 | 2,29 | 600,0 | 650,0 | 625,0 | 480,0 | 520,0 | 500,0 | 2191 | 2454 | 2323 | - | - | - |
| KE | 0,31 | 2,54 | 30,0 | 32,5 | 31,3 | 30,0 | 32,5 | 31,3 | -141 | -116 | -129 | - | - | - |
| Winterraps | 0,22 | 1,80 | 30,0 | 35,0 | 33,0 | 63,0 | 73,5 | 66,8 | 34 | 103 | 68,5 | - | - | - |
| Ölkürbis | 0,06 | 0,49 | 6,0 | 7,0 | 6,5 | - | - | - | 468 | 649 | 559 | - | - | - |
| Sonnenblume | 0,06 | 0,49 | 25,0 | 30,0 | 28,0 | 87,5 | 105,0 | 98,0 | -66 | 33 | -17 | - | - | - |
| KG**/****, AW u. LUZ | 2,22 | 18,17 | - | - | - | 110,0 | 120,0 | 115,0 | - | - | - | - | - | - |

Die konventionellen Betriebe der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD verfügten durchschnittlich über 18,0 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 67,8 % (12,2 ha) betrug.

4.3.4.3 Nördliche Randalpen – Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

Biologische Betriebe

In den Biobetrieben der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD dominierten Getreide und Feldfutter (Kleegras, Ackerwiesen u. Luzerne). Der Getreide- und Maisanteil betrug etwa 33 % und der Anteil an Kleegras über 57 %. Der Feldfutterbau war zweimal so hoch wie in konventionellen Betrieben dieser Region. Alle anderen Kulturen waren nur von untergeordneter Bedeutung (Tabelle 18). Es wurde kein Körnermais, keine Zuckerrübe, keine Sonnenblume und keine Körnerleguminosen angebaut.

Tabelle 18: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|-----------------------|------|----------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|------|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW | 0,18 | 3,46 | 36,0 | 40,0 | 38,0 | 39,6 | 44,0 | 41,8 | 550 | 658 | 604 | 98 | 124 | 111 |
| Hafer*/**, SG, SW | 0,62 | 11,92 | 31,5 | 31,5 | 31,5 | 31,5 | 31,5 | 31,5 | 164 | 164 | 164 | 87 | 87 | 87 |
| Triticale*/**, Roggen | 0,30 | 5,77 | 36,0 | 40,5 | 38,0 | 46,8 | 52,7 | 49,4 | 231 | 311 | 271 | 142 | 177 | 157 |
| Dinkel | 0,29 | 5,58 | 28,0 | 35,0 | 32,0 | 36,4 | 45,5 | 41,6 | 626 | 914 | 770 | 146 | 217 | 181 |
| WG* | 0,11 | 2,12 | 36,0 | 44,0 | 40,0 | 36,0 | 44,0 | 40,0 | 399 | 578 | 489 | 119 | 177 | 148 |
| Silomais**** | 0,22 | 4,23 | - | - | - | 113,0 | 139,0 | 126,0 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 0,02 | 0,38 | 189,0 | 210,0 | 200,0 | - | - | - | 2843 | 3420 | 3132 | - | - | - |
| KE | 0,12 | 2,31 | 22,5 | 27,5 | 25,0 | 22,5 | 27,5 | 25,0 | -17 | 91 | 37 | - | - | - |
| Ölkürbis | 0,02 | 0,38 | 3,6 | 4,1 | 3,8, | - | - | - | 865 | 1066 | 966 | - | - | - |
| KG**/****, AW u. LUZ | 2,99 | 57,50 | - | - | - | 110,0 | 120,0 | 115,0 | - | - | - | - | - | - |

Legende: WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, SW = Sommerweizen; WG = Wintergerste, KE = Körnererbse, LU = Lupine, KG = Klee gras, AW = Ackerwiesen, LUZ = Luzerne, MW = Mittelwert, HP = Hauptprodukt (Korn, Rübe, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll
 *Futterware, **DB für fett markierte Kulturart (höherer Flächenanteil), ***alle Erträge aus BMLFUW (2002a) außer KG: FREYER ET AL. (2005: S. 26), ****Trockenmasseerträge

Die biologischen Betriebe der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD verfügten durchschnittlich über 22,3 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 23,1 % (5,2 ha) betrug.

Konventionelle Betriebe

In den konventionellen Betrieben der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD dominierten Getreide und Mais. Der Feldfutterbau betrug ca. 27 %. Alle anderen Kulturen waren von untergeordneter Bedeutung (Tabelle 19):

Tabelle 19: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

| Kultur | ha | % der AF | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | Ertrag in dt ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | | DB in € ha ⁻¹ | | |
|---------------------------|------|----------------|-------------------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------|-----|------|--------------------------|-----|-----|
| | | | HP*** | | | NP | | | HP | | | NP | | |
| | | | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW | von | bis | MW |
| WW | 0,98 | 11,25 | 50,0 | 55,0 | 53,0 | 55,0 | 60,5 | 58,3 | 28 | 63 | 46 | 98 | 122 | 110 |
| SG**/**, Hafer, SW | 0,87 | 9,99 | 42,5 | 45,0 | 44,0 | 42,5 | 45,0 | 44,0 | -44 | -34 | -39 | 80 | 93 | 87 |
| Triticale**/**, Roggen | 0,25 | 2,87 | 45,0 | 52,5 | 49,0 | 58,5 | 68,3 | 63,7 | -49 | 6 | -22 | 113 | 156 | 136 |
| WG* | 0,95 | 10,91 | 50,0 | 55,0 | 53,0 | 50,0 | 55,0 | 53,0 | -5 | 56 | 10,5 | 120 | 146 | 133 |
| Körner- mais*/**** | 0,60 | 6,89 | 65,0 | 72,5 | 69,0 | 65,0 | 72,5 | 68,8 | -284 | - | - | - | - | - |
| Silomais**** | 2,20 | 25,26 | - | - | - | 150,0 | 165,0 | 158,0 | - | - | - | - | - | - |
| Kartoffel | 0,01 | 0,11 | 225,0 | 275,0 | 250,0 | - | - | - | 112 | 467 | 290 | - | - | - |
| KE | 0,10 | 1,15 | 30,0 | 32,5 | 31,3 | 30,0 | 32,5 | 31,3 | -141 | - | - | - | - | - |
| Winterraps | 0,14 | 1,61 | 25,0 | 30,0 | 28,0 | 52,5 | 63,0 | 58,8 | -38 | 34 | -2 | - | - | - |
| Sonnenblume | 0,01 | 0,11 | 20,0 | 25,0 | 23,0 | 70,0 | 87,5 | 80,5 | -224 | - | - | - | - | - |
| KG**/****, AW u. LUZ | 2,39 | 27,44 | - | - | - | 110,0 | 120,0 | 115,0 | - | - | - | - | - | - |

Legende: WW = Winterweizen, SG = Sommergerste, SW = Sommerweizen; WG = Wintergerste, KE = Körnererbse, KG = Klee gras, AW = Ackerwiesen, LUZ = Luzerne, MW = Mittelwert, HP = Hauptprodukt (Korn, Rübe, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll
 *Futterware, **DB für fett markierte Kulturart (höherer Flächenanteil), ***alle Erträge aus BMLFUW (2002b)
 ****Trockenmasseerträge

Die konventionellen Betriebe der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD verfügten durchschnittlich über 18,1 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, wobei der Anteil der Ackerfläche 48,1 % (8,7 ha) betrug.

4.3.5 Weiterentwicklung der Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau

Entwicklung der Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen

Um praxisübliche Fruchtfolgen in Hinblick auf eine Biogaserzeugung zu generieren, wurden erstens Kulturarten mit einem hohen Methanhektarertrag in die Fruchtfolge eingegliedert, die nach WALLA und SCHNEEBERGER (2005c) wirtschaftlich sind. Zweitens wurden Kulturen mit hohem Marktpreis bzw. Kulturen, die zur menschlichen Ernährung dienen und aus ökonomischen bzw. ethischen Gründen nicht in der Biogasanlage vergärt worden sind, als Marktfrüchte verkauft. Weizen wurde daher für die Biogasproduktion ausgeschlossen, da hier die Marktnachfrage hoch ist. Triticale ist nur bedingt sinnvoll, da unter ethischen Gesichtspunkten im biologischen Landbau dieses Getreide der Tierhaltung vorbehalten ist. Dies gilt nicht zuletzt auch für den Weizen. Roggen stellt einen Grenzfall dar, da diese Kultur in der Fruchtfolge gesundend wirkt, als Strohproduzent (C-Quelle) von Bedeutung ist sowie in der menschlichen

Ernährung eine wichtige Position einnimmt. Andererseits ist der Roggen derzeit schwer am Markt absetzbar.

Der Anteil der Kulturen, die für die Energiepflanzenerzeugung genutzt werden, bleibt dabei entweder gleich oder erhöht sich, je nach ihrer Wirtschaftlichkeit, im Rahmen der Vorgaben bei der Fruchtfolgeerstellung. Der Anteil der Marktfrüchte mit der höchsten Wirtschaftlichkeit wurde erweitert, auf Kosten von denen mit geringerer Wirtschaftlichkeit. Die Wirtschaftlichkeit der Marktfrüchte wurde nach den Deckungsbeiträgen laut BMLFUW (2002a und 2002b) beurteilt.

Daraus folgte, dass im biologischen Landbau als Energiepflanzen vor allem Luzernegras bzw. Klee gras und in geringerem Umfang auch Silomais angebaut werden. Da Luzernegras bzw. Klee gras im biologischen Landbau Stickstoff für die Folgefrüchte liefert und auch ohne Biogasanlage angebaut wird (wichtigster Stickstofflieferant im biologischen Landbau), ist Luzernegras bzw. Klee gras dem Silomais als Rohstoff für die Biogasanlage überlegen (Walla und Schneeberger 2005a). Im konventionellen Landbau wurde ausschließlich Silomais als Energiepflanze angebaut. Aufgrund des geringen Hektarertrages und der günstigen Stickstoffdünger im konventionellen Landbau, rangierte das Luzernegras weit hinter Silomais (WALLA und SCHNEEBERGER 2005a).

Aufgrund der Absatzschwierigkeiten und der untergeordneten Bedeutung von Zuckerrüben im ökologischen Landbau wurde auf deren Einbeziehung in die Fruchtfolge verzichtet. Im konventionellen Landbau werden höchstens 7 % Zuckerrübe in der Region Weinviertel und höchstens 2,3 % Zuckerrübe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD in die Fruchtfolge eingegliedert. Diese Werte entsprechen den jeweiligen mittleren Kulturartenanteilen. Es wird angenommen, dass diese Werte den aktuellen Lieferkontingenten für die Zuckererzeugung entsprechen. Sie werden aus ökonomischen Gründen beibehalten.

WALLA UND SCHNEEBERGER (2005c) haben berechnet, dass eine Bergung und Vergärung von Stroh wegen der niedrigen Methanhektarerträge nicht wirtschaftlich ist. Das Getreidestroh wird aufgrund dessen bei den Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau nicht der Biogasanlage zugeführt. Bei den Zwischenfrüchten gilt dasselbe. Auch hier war bei den unterstellten Erträgen (WALLA UND SCHNEEBERGER 2005c) und Kosten im ökologischen Landbau die Vergärung nicht wirtschaftlich. Im konventionellen Landbau wurde von den gleichen Annahmen ausgegangen.

Bei Betrieben mit Viehhaltung (biologisch und konventionell) wurden Brachen für die Biogasproduktion genutzt. Obwohl im konventionellen Landbau der Silomais bei den Erzeugerpreisen 2004 dem Feldfutter ökonomisch überlegen war, kann der Maisanteil aus pflanzenbaulichen Gründen (Krankheiten und Schädlingsbefall) in der Fruchtfolge gesenkt werden und durch Feldfutter ersetzt werden (WALLA UND SCHNEEBERGER 2005c), um so eine nachhaltige Fruchtfolge zu erhalten. Weiters wird Futtergetreide durch Silomais ersetzt. Durch den Anbau von Energiepflanzen für die Biogasanlage muss Kraft- bzw. Energiefutter für die Tiere zugekauft werden. Der Arbeitszeitbedarf steigt ebenfalls, gleichzeitig aber auch das Einkommen (WALLA UND SCHNEEBERGER 2005a). Bei Betrieben mit Viehhaltung wurden auch die Methanhektarerträge von vergorener Schweine- bzw. Rindergülle herausgerechnet.

Entwicklung der Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau mit maximalem Methanhektarerträgen

Ausgehend von den Fruchtfolgen, die nach den Kriterien für den Energiepflanzenanbau unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen entwickelt wurden, wur-

den zur Entwicklung der Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau mit maximalem Methanhektarerträgen statt Getreidekulturen mit geringem Marktwert Ganzpflanzensilagen angebaut und in der Biogasanlage vergoren. Nur Dinkel und Winterweizen wurden im biologischen Landbau, und Winterweizen und Zuckerrübe (höchstens 7 % Zuckerrübe in der Region Weinviertel und höchstens 2,3 % Zuckerrübe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD) nur im konventionellen Landbau als Marktfrüchte verkauft. Außerdem wurden alle Nebenprodukte (Stroh, Blatt, Kürbisfleisch) der Biogasanlage zugeführt, mit Ausnahme vom Kartoffelblatt (zur Ernte nicht mehr verwertbar). Nach WALLA UND SCHNEEBERGER (2005c) wäre das in der Praxis nicht wirtschaftlich. Die daraus resultierenden Methanhektarerträge sollen aber zeigen, was maximal an Methan bei standortüblichen Ertragsniveaus aus der Fruchtfolge herauszuholen wäre. Auch Zwischenfrüchte wurden vergoren. In der Praxis gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Zwischenfrüchten. Da in der Literatur nur Methanhektarerträge für Klee gras vorliegen, wurde dieser Wert bei allen Zwischenfrüchten angenommen.

Kalkulation der Gasproduktion

Aufbauend auf den regions- und betriebstypspezifischen Fruchtfolgen und mittleren Ertragsniveaus sowie Annahmen über innerhalb der Regionen typische Betriebstypen, wurden die Erträge mit den Stammdaten der Gasproduktion multipliziert und über die Fruchtfolgen aufsummiert.

Düngeempfehlungen für anfallende Gärsubstrate

Um eine Düngeempfehlung für das anfallende Gärsubstrat zu erstellen, wurde mittels der Stickstoffgehalte der Kulturen aus der Literatur die verfügbare N-Menge der Gärsubstrate errechnet. Bei Schlagteilungen wurde immer die verfügbare N-Menge der Kultur angenommen, die den höheren Fruchtfolgeanteil besitzt. Bei gleichen Anteilen wurde die mittlere N-Menge beider Kulturen errechnet. Da für den konventionellen Landbau keine N-Werte für Zwischenfrüchte angegeben waren, werden die Werte für den biologischen Landbau herangezogen. Da die N-Verluste während der anaeroben Fermentation und Biogaserzeugung vernachlässigbar sind, entspricht die mit den Energiepflanzen anfallende N-Menge der N-Menge im Gärsubstrat. Lagerungs- und Ausbringungsverluste wurden nicht angenommen. Anschließend wurden der verfügbaren N-Menge des Gärsubstrates die N-Entzüge der Fruchtfolge gegenübergestellt. Bei Schlagteilungen wurde immer der N-Entzug der Kultur angenommen, die den höheren Fruchtfolgeanteil besitzt. Bei gleichen Anteilen wurde der mittlere N-Entzug beider Kulturen errechnet. Bei Ganzpflanzensilagen (z.B. bei Sommergerste) wurde der Ertrag dem Korn bzw. Strohanteil zugeteilt (je nach Korn-Strohverhältnis) und mit den vorliegenden Stickstoffwerten multipliziert. Danach wurde entsprechend den Entzügen eine Düngerempfehlung formuliert. Wenn genügend N aus Gärsubstrat zur Verfügung stand, wurden Kulturen mit hohem N-Bedarf (Winterweizen, Mais) mit N-Gaben gedüngt, die um bis zu 20 % über den Entzügen liegen, um die N-Verfügbarkeit des Gärsubstrats von ca. 60 % zu berücksichtigen.

Tabelle 20: Mittlere Trockenmasse- und Stickstoffgehalte wichtiger Kulturpflanzen im biologischen und konventionellen Landbau

| <i>Biologischer Landbau*</i> | | | <i>Konventioneller Landbau**</i> | | |
|------------------------------|-------------|------------------|----------------------------------|-------------|------------------|
| <i>Erntegut</i> | <i>% TM</i> | <i>% N in TM</i> | <i>Erntegut</i> | <i>% TM</i> | <i>% N in TM</i> |
| Getreide (Stroh) | 86,0 | 0,30 | Getreide (Stroh) | 86,0 | 0,60 |
| Silomais | 30,0 | 0,35 | Zuckerrübenblatt | 16,0 | 0,29 |
| Klee-Luzerne-Gras | 20,0 | 0,55 | Silomais | 28,0 | 0,35 |
| Legumiosen (ZF) | 20,0 | 0,55 | Rotklee | 20,0 | 0,55 |
| Nichtleguminose (ZF) | 20,0 | 0,50 | Futterroggen | 22,5 | 0,35 |
| Sonnenblume (Korn) | 91,0 | 2,4 | Ackergras | 22,5 | 0,50 |
| Sonnenblume (Stroh)**** | 96,0 | 1,3 | Klee gras*** | 20,0 | 0,53 |
| Weizen (Korn) | 86,0 | 1,6 | Luzerne | 20,0 | 0,60 |
| Sommergerste (Korn) | 86,0 | 1,4 | Weizen (Korn) | 86,0 | 2,0 |
| Roggen (Korn) | 86,0 | 1,5 | Gerste (Korn) | 86,0 | 1,7 |
| Triticale (Korn) | 86,0 | 1,5 | Roggen (Korn) | 86,0 | 1,6 |
| Hafer (Korn) | 86,0 | 1,5 | Triticale (Korn) | 86,0 | 1,8 |
| Dinkel | 86,0 | 1,6 | Hafer (Korn) | 86,0 | 1,6 |
| – | – | – | Raps (Korn) | 91,0 | 3,3 |
| – | – | – | Raps (Stroh) | 86,0 | 0,7 |
| – | – | – | Rapspresskuchen***** | 91,0 | 3,8 |

ZF = Zwischenfrucht

Quelle: *STEIN-BACHINGER ET AL. (2004); **FRÜCHTENICHT ET AL. (1993), PERETZKI UND DITTMANN (2004); ***FREYER (2003); ****DEISENROTH ET AL. (2004), *****KTBL (2005)

Als Höchstgrenze für die Stickstoffdüngung wurden im biologischen Landbau die N-Dünevorschriften im Ackerbau und Weinbau gemäß ÖPUL-Richtlinien (BMLFUW, 2000) herangezogen (Tabelle 21). Die Höchstgrenzen für die N-Düngung für das Grünland richten sich ebenfalls nach den ÖPUL-Richtlinien (Annahme: mittlere Ertragslage, Dauer- und Wechselwiese mit drei Schnitten, gräserbetont: 120 kg N ha⁻¹). Stickstoffgaben über 100 kg N ha⁻¹ in schnellwirkender Form (Gärs substrat) müssen laut ÖPUL-Richtlinien (BMLFUW, 2000) geteilt werden. Im konventionellen Landbau wurden als Höchstgrenze die Richtlinien laut „Aktionsprogramm Nitratrichtlinie“ basierend auf dem Wasserrechtsgesetz herangezogen, die auf Ackerland bewilligungsfrei 175 kg Stickstoff ha⁻¹ und auf Dauergrünland 210 kg Stickstoff ha⁻¹ und Jahr erlauben.

Tabelle 21: Höchstwerte für die N-Düngung im Ackerbau bei mittlerer Ertragserwartung (laut ÖPUL-Richtlinien 2000)

| <i>Kultur</i> | <i>kg N ha⁻¹</i> | <i>Kultur</i> | <i>kg N ha⁻¹</i> |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Weizen | 130 | Kartoffel | 80 |
| Wintergerste | 120 | Erbse, Ackerbohne | 0 |
| Triticale | 110 | Sojabohne | 0 |
| Roggen | 100 | Sonnenblume | 60 |
| Hafer | 90 | ZF (ohne Leguminosen) | 80 |
| Mais | 140 | ZF (mit Leguminosen) | 40 |

ZF = Zwischenfrucht, Quelle: BMLFUW (2000)

Bei Luzerneanbau wurde angenommen, dass dem Betrieb zusätzlich ca. 160 kg N ha⁻¹ aus Stoppel- und Wurzelrückständen der Luzerne zur Verfügung stehen (Annahme: Wurzel- und Stoppelrückstände = 53 dt TM ha⁻¹ [FREYER ET AL. 2005]) /0,2 TM/FM * 0,6 kg N ha⁻¹ in der FM [FRÜCHTENICHT ET AL. 1993] ≈ 160 kg N ha⁻¹). Bei Kleegrasanbau wurden 100 kg N ha⁻¹ aus Stoppel- und Wurzelrückständen angenommen (Annahme: Wurzel- und Stoppelrückstände = 35 dt TM ha⁻¹ [FREYER et al. 2005]) /0,2 TM/FM * 0,55 kg N ha⁻¹ in der FM [STEIN-BACHINGER ET AL. 2004] ≈ 100 kg N ha⁻¹). Die gleichen N-Mengen wurden auch bei zweijährigem Luzerne- bzw. Kleegrasanbau angenommen, im Ausgleich dazu wurden höhere TM-Erträge im ersten Nutzungsjahr beider Futterleguminosen angenommen. Die N-Menge aus Stoppel- und Wurzelrückständen der Luzerne bzw. des Kleegrases wurde an allen Standorten als gleich angenommen. Die erste Kultur nach Luzerne- oder Klee gras nützt den Stickstoff aus Luzerne- bzw. Klee grasrückständen, daher muss sie nicht gedüngt werden. In diesem Fall ist auch keine Kalkulation des Entzugs nötig. Wenn genügend Dünger aus dem Biogasprozess zur Verfügung steht, können Kulturen mit hohem N-Bedarf wie Winterweizen oder Mais auch nach Luzerne oder Klee gras eine Spätdüngung erhalten. Bei Betrieben mit Schweine- oder Rinderhaltung wurde auch der N-Anfall der tierischen Gülle errechnet. Bei den Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen wurde der N-Anfall der Frischgülle berechnet, bei den Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen wurde der N-Anfall der in der Biogasanlage vergorenen Gülle berechnet (Tabelle 22).

Tabelle 22: N-Gehalte in Frisch- und Biogasgülle unterteilt in Schweine- und Rindergülle

| | <i>Schweinegülle</i> | | <i>Rindergülle</i> | |
|----------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | <i>Frischgülle</i> | <i>Biogasgülle</i> | <i>Frischgülle</i> | <i>Biogasgülle</i> |
| N (% TM) | 0,48 | 0,45 | 0,41 | 0,38 |

Quelle: PERETZKI und DITTMANN (2004)

5 Ergebnisse

In dem nachfolgenden detaillierten Ergebnisteil werden die Ergebnisse zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten dargestellt und in den Leitlinien Schlussfolgerungen gezogen.

5.1 Biomasseertrag, Qualität, Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt von Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 1.1. und 1.2.)

Die Untersuchungen dieser Arbeitspakete verliefen planmäßig, termingerecht und erfolgreich in intensiver Kooperation mit den Partnern der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf, der Raiffeisen Ware Austria (RWA) und Pioneer Saaten GmbH. Durch das große Engagement und die zusätzlich eingebrachten finanziellen Leistungen der Partner entstand die Möglichkeit, ohne Einschränkung der beauftragten Inhalte der Arbeitspakete, das pflanzenbauliche Versuchsprogramm zu erweitern. Aus diesem Grund wurden zusätzlich zu den im Projektantrag aufgeführten Energiepflanzen (Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen und Triticale) auch die Energiepflanzen Roggen und Mais in die Untersuchungen mit aufgenommen.

Von den Energiepflanzen Sonnenblumen, Weizen, Triticale, Roggen, Wiesengras und Mais wurden auf verschiedenen Standorten in Österreich verschiedene Sorten in Praxisfeldversuchen angebaut. Im Verlauf der Vegetation ändert sich die Zusammensetzung der Nährstoffe in den Biomassen der Pflanzen. Aufgrund dessen erfolgte die Ernte der Bestände auf allen Standorten von allen Pflanzenarten und -sorten zu vier bis sechs aufeinander folgenden, verschiedenen Ernteterminen. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die sich über den Vegetationsverlauf verändernden Nährstoffzusammensetzungen der Biomasse in den Gärrohstoffen repräsentiert waren. Von allen Sorten sämtlicher Praxisfeldversuche wurden zu jedem Erntezeitpunkt Ertragsmessungen durchgeführt. Die gewonnenen Biomasseproben wurden an die Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf gebracht, zerkleinert und einsiliert.

Die Ergebnisse der Feldversuche für die Energiepflanzenarten Getreide, Sonnenblumen, Wiesengras und Mais werden der Reihe nach getrennt dargestellt.

5.1.1 Getreide (Weizen, Roggen, Triticale)

Feldsortenversuche für die verschiedenen Getreidearten wurden an folgenden Standorten durchgeführt: Loimersdorf (Niederösterreich), Schwanenstadt, Schörfling am Attersee und Lenzing (Oberösterreich). Tabelle 23 zeigt wichtige Kennwerte der Anbaustandorte wie Witterungsbedingungen (Niederschlag und Temperatur), vorherrschender Bodentyp und wesentliche Kennwerte der Kulturführung wie Vorfrucht, Aussaatzeitpunkt, Saatstärke, Herbizid- und Fungizidbehandlungen sowie die durchgeführten Düngungsmaßnahmen.

Für die Ertragsbildung von Getreideganzpflanzen waren die Witterungsbedingungen der Vegetationsperiode 2004 sehr gut und repräsentativ für den oberen Ertragsdurchschnitt der letzten Jahre.

Tabelle 23. Übersicht über wichtige Daten zu den Getreidestandorten und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen

| Getreideart und Sorte | Standort | Niederschlag und Temperatur im Jahresdurchschnitt | Bodentyp | Vorfrucht | Aussaat-termin | Körner ha ⁻¹ | Herbizid | Fungizid | Düngung |
|-----------------------|------------------------|---|------------------|-------------|----------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|--|
| Weizen | | | | | | | pro ha | pro ha | pro ha |
| Capo und Edison | Loimersdorf | 530 mm 9,3 °C | Braunerde | Sommerdurum | 13.10.03 | 3,3 Mio. | 2,5l Andiamo | - | 116 kg N |
| Levendis und Tulsa | Schwanenstadt | 810 mm 8,2°C | Schwarzerde/Lehm | Mais | 10.10.03 | 3,5 Mio. | 180 g Concert | Juwel Top 0,8 l | 175 kg N |
| Roggen | | | | | | | | | |
| Beskud | Schörfling am Attersee | 1200 mm 7,6°C | Toniger Lehm | Körnermais | 03.10.03 | 3,0 Mio. | Attribut, Harmony extra | Stratego 0,8 l | 66 kg N 50 kg P ₂ O ₅ 120 kg K ₂ O |
| Triticale | | | | | | | | | |
| Tremplin und Talentro | Lenzing | 1200 mm 7,6°C | Sandiger Lehm | Silomais | 27.09.03 | 3,0 Mio. | Art. 0,8l, H.Super 120 g | Stratego 0,8 l | 141 kg N 84 kg P ₂ O ₅ 120 kg K ₂ O |

Wie aus Tabelle 23 zu entnehmen ist, wurden für den Anbau alle Getreidearten Wintersorten verwendet. Beim Weizen wurden die Wintersorten Capo und Edison am Standort Loimersdorf, sowie die Sorten Levendis und Tulsa am Standort Schwanenstadt angebaut. Winterroggen der Sorte Beskud wurde am Standort Schörfling am Attersee angebaut. Für Triticale wurden die Wintersorten Tremplin und Talentro verwendet. Der Feldversuchsstandort war Lenzing. Die Schlaggröße jeder Sorte betrug 1000 bis 2000 m². Sämtliche Feldversuche wurden im Verlauf der Vegetation zu fünf verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanzenbestände beprobt. Dazu wurde Biomasse jeweils von 1 bis 2 m² Fläche an repräsentativen Stellen der homogenen Feldversuchflächen geerntet. Das Gewicht der frischen Biomasse wurde vor Ort bestimmt. Der Gehalt an Trockenmasse und Asche wurde unmittelbar nach der Ernte im Labor der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf bei allen entnommenen Proben ermittelt.

Tabelle 24 zeigt das jeweilige Erntedatum, das zum jeweiligen Erntezeitpunkt erreichte Stadium der Vegetationsentwicklung der Pflanzenbestände (ECA-Stadium), die genaue Beschreibung des vorliegenden Entwicklungsstadiums der Pflanzen zum Erntezeitpunkt und das Alter der Pflanzenbestände in Tagen ab dem Tag der Aussaat (Wachstumstag).

Tabelle 24. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Getreidebestände zum Erntezeitpunkt¹

| Getreideart | Weizen | | | | Roggen | Triticale | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Sorte | Capo | Edison | Levendis | Tulsa | Beskud | Tremplin | Talentro |
| 1. Ernte | 13.05.04 | 13.05.04 | 14.05.04 | 14.05.04 | 14.05.04 | 14.05.04 | 14.05.04 |
| Vegetationsstadium ECA 33-39 | 4-Knoten | 3-Knoten | 3-4 Knoten | | 4-Knoten | 3-4 Knoten | |
| Wachstumstag | 213 | 213 | 216 | 216 | 223 | 229 | 229 |
| 2. Ernte | 03.06.04 | 03.06.04 | 03.06.04 | 03.06.04 | 03.06.04 | 03.06.04 | 03.06.04 |
| Vegetationsstadium ECA 57-59 | Ähre-Rispe | | | | | | |
| Wachstumstag | 234 | 234 | 237 | 237 | 244 | 250 | 250 |
| 3. Ernte | 22.06.04 | 22.06.04 | 28.06.04 | 28.06.04 | 28.06.04 | 28.06.04 | 28.06.04 |
| Vegetationsstadium ECA 74-75 | Milchreife der Körner | | | | | | |
| Wachstumstag | 253 | 253 | 262 | 262 | 269 | 275 | 275 |
| 4. Ernte | 15.07.04 | 15.07.04 | 22.07.04 | 22.07.04 | 22.07.04 | 22.07.04 | 22.07.04 |
| Vegetationsstadium ECA 84-85 | Teigreife der Körner | | | | | | |
| Wachstumstag | 276 | 276 | 286 | 286 | 293 | 299 | 299 |
| 5. Ernte | 01.08.04 | 01.08.04 | 09.08.04 | 09.08.04 | 09.08.04 | 09.08.04 | 09.08.04 |
| Vegetationsstadium ECA 95-99 | Totreife der Körner | | | | | | |
| Wachstumstag | 293 | 293 | 304 | 304 | 311 | 317 | 317 |

¹Daten und Proben wurden von Raiffeisen Ware Austria AG zur Verfügung gestellt.

Zum Beispiel wurde Weizen der Wintersorte Capo am 13.05.2004 das erste Mal geerntet. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Bestand das ECA-Stadium 33–39 (4-Knotenstadium der Pflanzen) erreicht. Das Alter des Bestandes betrug 213 Tage. Die fünfte und letzte Ernte dieser Sorte wurde am 01.08.2004 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war der Bestand bis zur Druschreife (Totreife der Pflanzen) völlig ausgereift. Da totreife Pflanzen nicht mehr silierfähig sind, wurde die geerntete Biomasse der Getreideganzpflanzen aus dem Vegetationsstadium ECA 95–99 „Totreife der Körner“ bis zur Verwendung in dem Laborversuch eingefroren.

Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die verschiedenen Getreidearten im Vegetationsverlauf zu den spezifischen Ernteterminen.



Abbildung 9. Weizenbestand der Sorte Capo zu allen fünf Ernteterminen (Standort: Loimersdorf, Niederösterreich)



Abbildung 10. Roggenbestand der Sorte Beskud zum ersten, dritten und fünften Erntetermin (Standort: Schörfling am Attersee, Oberösterreich)



1 Ernte – 229 Wuchstage
3-4 Knoten

3 Ernte – 275 Wuchstage
Milchreife

5 Ernte – 317 Wuchstage
Totreife

Abbildung 11. Triticalebestand der Sorte Talentro zum ersten, dritten und fünften Erntetermin (Standort: Lenzing, Oberösterreich)

5.1.1.1 Biomasseertrag des Getreides

Für die Bestimmung des Methanhektarertrages und um den optimalen Erntetermin für die verschiedenen Energiepflanzenarten und -sorten ableiten zu können, muss die Ertragsentwicklung der Bestände im Verlauf der Vegetation bekannt sein. Tabelle 25 zeigt den Verlauf der Ertragsentwicklung aller Getreidearten und -sorten, für die Feldsortenversuche durchgeführt wurden. Dargestellt sind der Frischmasseertrag, der Trockenmassegehalt, der Rohaschegehalt und der Trockenmasseertrag der Getreidearten und -sorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände.

Tabelle 25. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der verschiedenen Getreidearten und -sorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände

| Getreideart | Weizen | | | | Roggen | Triticale | |
|--------------------------|-----------------------|----------|------------|-------|----------|------------|----------|
| Sorte | Capo | Edison | Levendis | Tulsa | Beskud | Tremplin | Talentro |
| 1. Ernte | 4-Knoten | 3-Knoten | 3-4 Knoten | | 4 Knoten | 3-4 Knoten | |
| FM [t ha ⁻¹] | 23,8 | 16,5 | 20,5 | 14,0 | 37,5 | 46,5 | 44,0 |
| TM [% FM] | 16,3 | 16,2 | 20,4 | 15,3 | 23,6 | 16,1 | 18,7 |
| Rohasche [% TM] | 10,2 | 12,3 | 11,5 | 13,2 | 8,8 | 16,3 | 14,1 |
| TM [t ha ⁻¹] | 3,9 | 2,7 | 4,2 | 2,1 | 8,9 | 7,5 | 8,2 |
| 2. Ernte | Ähre-Rispe | | | | | | |
| FM [t ha ⁻¹] | 50,5 | 51,5 | 56,0 | 49,5 | 42,0 | 65,5 | 63,5 |
| TM [% FM] | 17,1 | 18,1 | 21,3 | 17,1 | 24,5 | 22,3 | 23,2 |
| Rohasche [% TM] | 10,1 | 8,2 | 10,3 | 11,8 | 7,4 | 8,8 | 7,4 |
| TM [t ha ⁻¹] | 8,7 | 9,3 | 11,9 | 8,5 | 10,3 | 14,6 | 14,7 |
| 3. Ernte | Milchreife der Körner | | | | | | |
| FM [t ha ⁻¹] | 45,5 | 51,0 | 56,0 | 49,5 | 42,0 | 65,5 | 63,5 |
| TM [% FM] | 29,7 | 27,4 | 24,4 | 19,4 | 34,1 | 21,7 | 24,8 |
| Rohasche [% TM] | 5,9 | 7,2 | 8,6 | 8,5 | 5,2 | 6,8 | 5,7 |
| TM [t ha ⁻¹] | 13,5 | 14,0 | 13,7 | 9,6 | 14,3 | 14,2 | 15,8 |
| 4. Ernte | Teigreife der Körner | | | | | | |
| FM [t ha ⁻¹] | 29,0 | 33,5 | 48,5 | 42,5 | 33,0 | 49,0 | 47,5 |
| TM [% FM] | 65,7 | 56,7 | 27,7 | 37,2 | 45,6 | 30,3 | 29,9 |
| Rohasche [% TM] | 4,3 | 5,0 | 5,3 | 5,8 | 4,3 | 5,1 | 5,2 |
| TM [t ha ⁻¹] | 19,0 | 19,0 | 13,5 | 15,8 | 15,0 | 14,8 | 14,2 |
| 5. Ernte | Totreife der Körner | | | | | | |
| FM [t ha ⁻¹] | 21,5 | 18,5 | 22,0 | 26,0 | 18,5 | 21,5 | 20,5 |
| TM [% FM] | 89,7 | 90,3 | 75,8 | 69,6 | 69,1 | 71,6 | 73,9 |
| Rohasche [% TM] | 6,1 | 4,9 | 4,4 | 5,0 | 3,9 | 4,8 | 5,0 |
| TM [t ha ⁻¹] | 19,3 | 16,7 | 16,7 | 18,1 | 12,8 | 15,4 | 15,2 |

FM Frischmasse, TM Trockenmasse

Die Basis zur Erzielung hoher Methanhektarerträge sind möglichst hohe Trockenmasseerträge [t ha⁻¹] der Energiepflanzen. Hierbei sind solche Genotypenlinien interessant, die neben hohen Kornerträgen auch ein hohes Ertragsbildungsvermögen über die vegetativen Pflanzenteile besitzen.

Das Trockenmasseertragsniveau der verschiedenen Getreidesorten war auf gleichen Standorten bis zur maximalen Ertragsausbildung ähnlich hoch. Eine Ausnahme bildeten dabei nur die beiden auf dem Standort Schwanenstadt angebauten Weizensorten Levendis und Tulsa.

Stellt man die Ergebnisse der Ertragsermittlung der vier verschiedenen Weizensorten gegenüber, dann zeigt sich, dass die Sorten eine unterschiedliche genetische Veranlagung besitzen, Biomasse im Verlauf der Vegetation auszubilden. Zum Beispiel ist die Weizensorte Tulsa eine

kurzstrohige Hochleistungssorte für höchste Kornerträge. Auf dem Versuchsstandort Schwanenstadt wurden über 18 t TM ha⁻¹ gebildet. Die Weizensorte Levendis zeigte in der Jugendentwicklung bis zum Stadium der Milchreife ein hohes Wachstumsvermögen der Ganzpflanze. Sorten mit einer solchen genetischen Veranlagung eignen sich besonders gut zum Vorfruchtanbau. Die Weizensorten Capo und Edison hatten im Stadium der „Teigreife der Körner“ mit 19 t TM ha⁻¹ die höchsten Biomasseerträge.

Vergleicht man die verschiedenen Getreidearten miteinander, dann zeigt sich, dass sich Weizen, Roggen und Triticale während des Vegetationsverlaufs unterschiedlich schnell entwickelten. Während Triticale und Roggen in der Jugendentwicklung mehr Trockenmasse bildeten als die Weizensorten, zeigten die Weizensorten im Vergleich zum Roggen und Triticale gegen Ende der Vegetation höhere Biomasseerträge. Generell gesehen wiesen alle Getreidearten gute Biomasseerträge auf, sodass von der Ertragsseite her gesehen alle Getreidearten zur Erzeugung von Gärrohstoffen zur Nutzung in der Biogasproduktion geeignet sind. Roggen und Triticale eignen sich aufgrund ihrer besonderen Eigenschaft des hohen Biomassebildungsvermögens in der Jugendentwicklung der Pflanzen zusätzlich besonders gut zum Anbau als Vorfrucht vor Mais oder anderen Sommergetreidearten.

Der maximale Trockenmasseertrag pro Hektar wurde bei den meisten Getreidesorten im Wachstumsstadium der „Totreife der Körner“ (ECA 95–99) erreicht. Nur die Weizensorte Edison und die Roggensorte Beskud erreichten den maximalen Trockenmasseertrag schon im Wachstumsstadium der „Teigreife der Körner“ (ECA 84–85). Das Entwicklungsstadium der „Teigreife der Körner“ ist aus der Sicht der Ertragsbildung und der Silierfähigkeit der Biomasse als sehr günstig für die Ernte zur Gärrohstoffgewinnung zur Nutzung in der Biogaserzeugung einzustufen.

Die Weizensorte Capo zeigte vom Stadium „Teigreife“ bis „Totreife“ einen geringen Ertragszuwachs von 0,3 t TM ha⁻¹. Bei den Weizensorten Levendis und Tulsa war der TM-Ertragszuwachs mit 3,2 bzw. 2,3 t TM ha⁻¹ wesentlich höher. Bei den Triticalesorten Tremplin und Talentro lag der Ertragszuwachs von der „Teigreife“ zur „Totreife“ der Pflanzen bei 0,6 bzw. 1,0 t TM ha⁻¹. Bei der Weizensorte Edison und der Roggensorte Beskud nahmen die TM-Erträge der Ganzpflanzen im selben Vegetationszeitraum sogar wieder etwas ab. Bruch- und Atmungsverluste der Pflanzen können Ursachen dafür gewesen sein. Im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“ lag bei den Weizensorten das Ertragsniveau zwischen 13,5 t TM ha⁻¹ und 19,0 t TM ha⁻¹. Roggen erreichte einen durchschnittlichen Ertrag von 15,0 t TM ha⁻¹ im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“. Die Triticalesorten Talentro und Tremplin hatten einen Trockenmasseertrag von 14,2 bzw. 14,8 t TM ha⁻¹. Auf den gleichen Standorten waren Sortenunterschiede im TM-Ertrag der Ganzpflanzen zur 4. Ernte nicht wesentlich erkennbar. Allerdings unterschieden sich die Trockenmassegehalte in der Biomasse der Sorten zum Teil deutlich. Die Trockenmassegehalte der verschiedenen Getreidearten lagen zwischen 28 und 66 %.

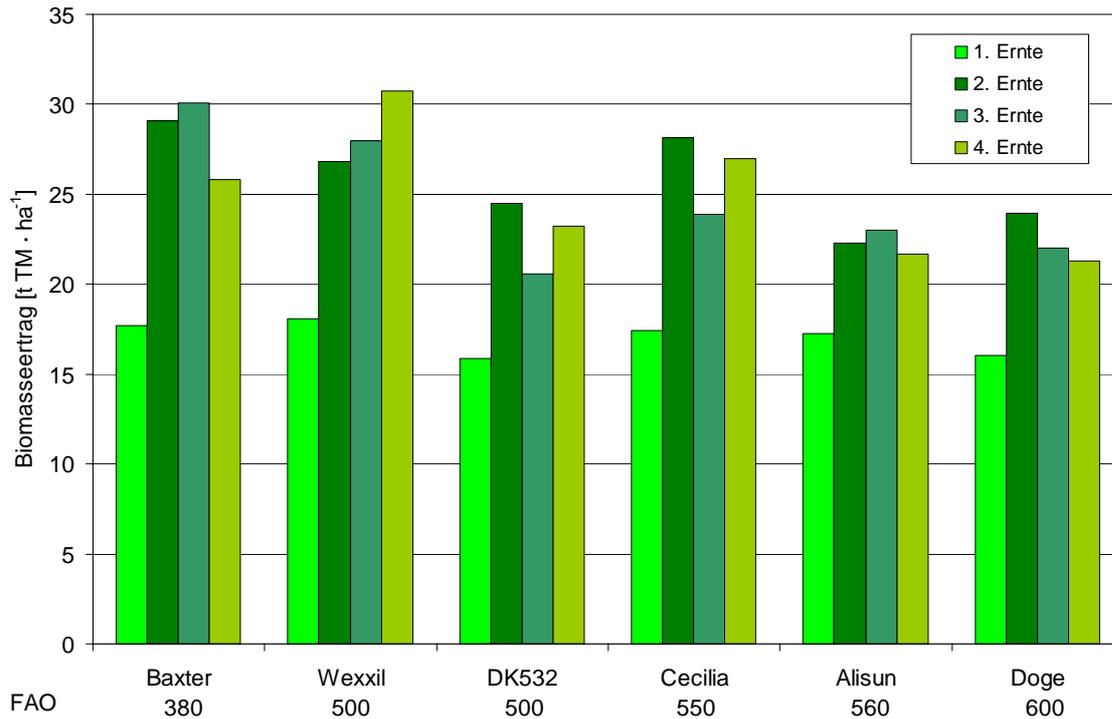


Abbildung 12. Entwicklung des Biomasseertrages der verschiedenen Getreidesorten

5.1.1.2 Qualität der Getreidesilagen

Von zwei der vier Weizensorten und von allen Triticalesorten wurden nach Abschluss des Silierprozesses Inhaltsstoffanalysen für folgende Parameter durchgeführt (Tabelle 26): Trockenmasse (TM), Rohasche (XA), organische Masse (oTS), Gesamtstickstoff (N_t), Ammoniumstickstoff (NH_4-N), Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), N-freie Extraktstoffe (XX), Kohlenstoff (C_t) und C/N Verhältnis. Zusätzlich wurden die Parameter Bruttoenergie (BE), Zucker (XZ), Stärke (XS) und die Aufschlüsselung der Rohfaser (XF) in Cellulose (Cel), Hemicellulose (H-Cel) und Lignin (ADL) bestimmt. Das spezifische Methanbildungsvermögen (CH_4 -Ausbeute) wurde zusätzlich auch noch an drei Ernteterminen für die Roggensorte Beskud gemessen (Abbildung 13).

Tabelle 26. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH₄-Ausbeute der Weizensorten Capo und Levendis und der Triticalesorten Talentro und Tremplin zu je 5 Ernteterminen

| Getreide- silage | Ernte | XP | XL | XF | XA | XX | ADL | BE | Cel | H-Cel | C _t | N _t | NH ₄ ⁺ N | XS | XZ | C/N | TM | oTS | CH ₄ - Ausbeute |
|---------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|----------------|----------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| | | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | MJ (kg TM) ⁻¹ | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | % FM | % TM | NI (kg oTS) ⁻¹ |
| Capo | 1. | 21,0 | 4,6 | 31,4 | 10,3 | 32,7 | 6,1 | 18,0 | 36,3 | 16,9 | 46,1 | 5,2 | 1,9 | 0,0 | 0,4 | 8,9 | 16,3 | 91,2 | 229 |
| | 2. | 11,3 | 1,6 | 39,0 | 8,9 | 39,2 | 9,7 | 18,6 | 45,5 | 20,6 | 46,6 | 2,3 | 0,5 | 0,0 | 0,6 | 20,0 | 17,1 | 89,9 | 342 |
| | 3. | 12,6 | 1,6 | 35,8 | 5,1 | 44,8 | 11,2 | 19,3 | 37,2 | 21,5 | 48,8 | 2,2 | 0,2 | 1,0 | 4,7 | 22,0 | 29,7 | 94,1 | 254 |
| | 4. | 11,5 | 1,0 | 27,7 | 4,4 | 55,4 | 6,5 | 18,9 | 28,6 | 32,2 | 47,4 | 2,1 | 0,2 | 22,4 | 2,8 | 23,0 | 65,7 | 95,7 | 228 |
| | 5. | 7,4 | 1,5 | 36,9 | 4,9 | 49,3 | 8,0 | 16,9 | 42,8 | 26,0 | 46,1 | 1,3 | 0,1 | 7,1 | 1,1 | 36,0 | 89,7 | 94,0 | 245 |
| Levendis | 1. | 23,1 | 3,3 | 25,9 | 11,5 | 36,2 | 6,2 | 17,3 | 33,4 | 18,2 | 46,1 | 4,1 | 0,4 | 0,0 | 0,6 | 11,3 | 20,4 | 89,7 | 343 |
| | 2. | 10,9 | 1,2 | 39,2 | 8,1 | 40,6 | 8,5 | 18,8 | 45,2 | 25,5 | 47,3 | 2,1 | 0,3 | 0,0 | 0,4 | 22,6 | 21,2 | 89,7 | 307 |
| | 3. | 15,0 | 1,4 | 39,5 | 11,5 | 32,7 | 9,0 | 18,7 | 43,0 | 27,2 | 44,5 | 2,7 | 0,3 | 0,0 | 0,2 | 16,7 | 24,4 | 91,5 | 244 |
| | 4. | 8,1 | 1,3 | 26,7 | 6,6 | 57,3 | 8,3 | 18,8 | 30,3 | 32,9 | 48,5 | 1,5 | 0,2 | 26,5 | 0,3 | 31,7 | 27,7 | 94,7 | 243 |
| | 5. | 8,9 | 1,6 | 29,0 | 4,4 | 56,0 | 8,3 | 18,1 | 34,6 | 28,7 | 47,0 | 1,6 | 0,1 | 17,1 | 0,4 | 30,3 | 75,8 | 95,6 | 251 |
| Talentro | 1. | 12,3 | 2,2 | 36,0 | 14,1 | 35,5 | 7,1 | 16,7 | 42,3 | 19,6 | 44,6 | 3,0 | 1,0 | 0,0 | 0,2 | 15,1 | 18,7 | 95,9 | 213 |
| | 2. | 11,1 | 1,2 | 35,4 | 6,6 | 45,7 | 13,2 | 18,9 | 37,0 | 16,0 | 48,6 | 2,0 | 0,2 | 0,0 | 3,0 | 24,6 | 23,2 | 94,9 | 264 |
| | 3. | 10,4 | 1,6 | 35,4 | 5,7 | 47,0 | 9,9 | 18,9 | 36,9 | 18,7 | 48,1 | 1,9 | 0,2 | 0,0 | 5,4 | 25,6 | 24,8 | 94,9 | 236 |
| | 4. | 10,1 | 1,5 | 29,5 | 6,1 | 52,8 | 8,9 | 18,8 | 33,1 | 23,2 | 48,1 | 1,9 | 0,2 | 0,0 | 1,0 | 26,0 | 29,9 | 94,9 | 241 |
| | 5. | 8,4 | 0,6 | 25,7 | 5,0 | 60,3 | 6,5 | 16,6 | 30,1 | 38,5 | 46,5 | 1,5 | 0,1 | 28,8 | 1,3 | 31,4 | 73,8 | 95,0 | 223 |
| Tremplin | 1. | 15,2 | 1,5 | 32,3 | 16,3 | 34,8 | 4,2 | 16,3 | 38,6 | 19,1 | 44,6 | 3,8 | 1,4 | 0,0 | 0,6 | 11,7 | 16,1 | 83,7 | 286 |
| | 2. | 13,4 | 1,6 | 33,1 | 7,4 | 44,5 | 10,2 | 18,8 | 36,0 | 20,6 | 47,6 | 2,4 | 0,2 | 0,0 | 1,7 | 20,2 | 22,3 | 91,0 | 255 |
| | 3. | 10,0 | 1,6 | 35,6 | 6,8 | 46,0 | 11,0 | 19,1 | 40,5 | 19,7 | 48,1 | 2,0 | 0,2 | 1,2 | 1,9 | 24,0 | 21,7 | 94,9 | 265 |
| | 4. | 9,9 | 1,5 | 26,3 | 5,2 | 57,0 | 7,2 | 17,4 | 29,0 | 20,9 | 47,4 | 1,8 | 0,2 | 8,8 | 13,1 | 26,6 | 30,3 | 94,9 | 232 |
| | 5. | 9,4 | 0,9 | 20,8 | 4,8 | 64,2 | 6,1 | 17,0 | 27,0 | 39,8 | 43,2 | 1,6 | 0,1 | 34,7 | 1,5 | 26,9 | 71,6 | 95,3 | 212 |

Wie die Übersicht über die Entwicklung der Qualitätsparameter der Weizensorten Capo und Levendis und der Triticalesorten Talentro und Tremplin im Verlauf der Vegetation zeigt, änderte sich die inhaltsstoffliche Zusammensetzung der Gärrohstoffe (Silagen) zum Teil beträchtlich. So nimmt zum Beispiel der Rohproteingehalt (XP) in den Silagen im Vegetationsverlauf deutlich ab. Rohfett (XL) hat von allen Hauptnährstoffgruppen (XP, XL, XF, XA, XX) den mit Abstand niedrigsten Gehalt in den Getreidesilagen. Aus diesem Grund könnte Rohfett bei Getreide ein limitierend wirkender Faktor für die Methanbildung sein. Die Gärrohstoffproben der Getreidesilagen der ersten Ernte (Wachstumsstadium „3-4 Knotenstadium“) zeigen deutlich höhere Rohaschegehalte (XA) als die der Silageproben aller folgenden Vegetationsstadien. Im Verlauf der Vegetation stieg der Gehalt an N-freien Extraktstoffen (XX) in den Gärrohstoffproben deutlich an. Mit Übergang von der vegetativen in die generative Phase der Bestände lagerten die Pflanzen mit Ausbildung der Ährenanlagen zunehmend Stärke in die Körner ein. Den höchsten Zuckergehalt hatten die Getreidesorten zur 3. bzw. 4. Ernte ausgebildet. Die Weizensorte Levendis bildete im Verlauf der Vegetation kaum Zucker aus.

Die Rohfaserbildung (XF) war in der Regel bis zum Wachstumsstadium „Milchreife der Körner“ (3. Ernte) abgeschlossen. Im weiteren Verlauf der Vegetation nahm der Gehalt an Rohfaser deshalb wieder etwas ab. Von den Komponenten der Rohfaserfraktion erreichte der Ligningehalt in den Vegetationsphasen „Ährenschieben“ (2. Ernte) bis zur beginnenden „Milchreife“ (3. Ernte) sein Maximum. Die Gehalte an Cellulose (Cel) waren während der Zeit der ersten drei Ernten am höchsten. Die höchsten Gehalte an Hemicellulose (H-Cel) wurden am Ende der Vegetationsphase in den Vegetationsstadien „Teigreife“ (4. Ernte) und „Totreife“ (5. Ernte) erreicht. Im Milchreifestadium der Körner (3. Ernte) war der Bruttoenergiegehalt (BE) in der Biomasse der Getreidesilagen am höchsten. Der Kohlenstoffgehalt (C_t) der Gärrohstoffe war im gesamten Beprobungszeitraum vom „3–4 Knotenstadium“ bis zur Totreife der Pflanzen relativ konstant. Durch die Veränderungen im N-Gehalt (N_t), speziell auch dem NH_4 -N-Gehalt, erweiterte sich das C/N-Verhältnis im Vegetationsverlauf deutlich, z.B. von 9 auf 36 bei der Sorte Capo. TM- und oTS-Gehalte nahmen im Verlaufe der Vegetationsentwicklung der Pflanzen erwartungsgemäß deutlich zu. Der TM-Gehalt der Gärrohstoffe lag während der ersten vier Ernten zwischen 16 und 30 %. Nach dem Vegetationsstadium „Teigreife“ stieg der TM-Gehalt der Gärrohstoffe bis auf 90 % (Capo) an. Eine optimale Silierfähigkeit von Biomasse ist mit TM-Gehalten von 30 bis 35 % zu erreichen. Bei TM-Gehalten von mehr als 40 % TM nimmt die Silierfähigkeit drastisch ab.

Abbildung 13 zeigt die spezifischen Methanerträge (NI (kg oTS⁻¹) von Weizen (Capo, Levendis), Roggen (Beskud) und Triticale (Tremplin, Talentro) im Vegetationsverlauf. Mit den Getreidesorten Weizen und Triticale wurden die höchsten spezifischen Methanerträge mit Silagen aus der 1. (3–4- Knotenstadium) bzw. 2. Ernte (Ährenschieben) erzielt. Im weiteren Verlauf der Vegetation nahmen die spezifischen Methanerträge mit diesen Getreidesorten wieder ab. Im Unterschied dazu zeigte die Roggensorte Beskud erst am Ende der Vegetationsperiode die höchsten spezifischen Methanerträge, was auf Sortenunterschiede hinweist.

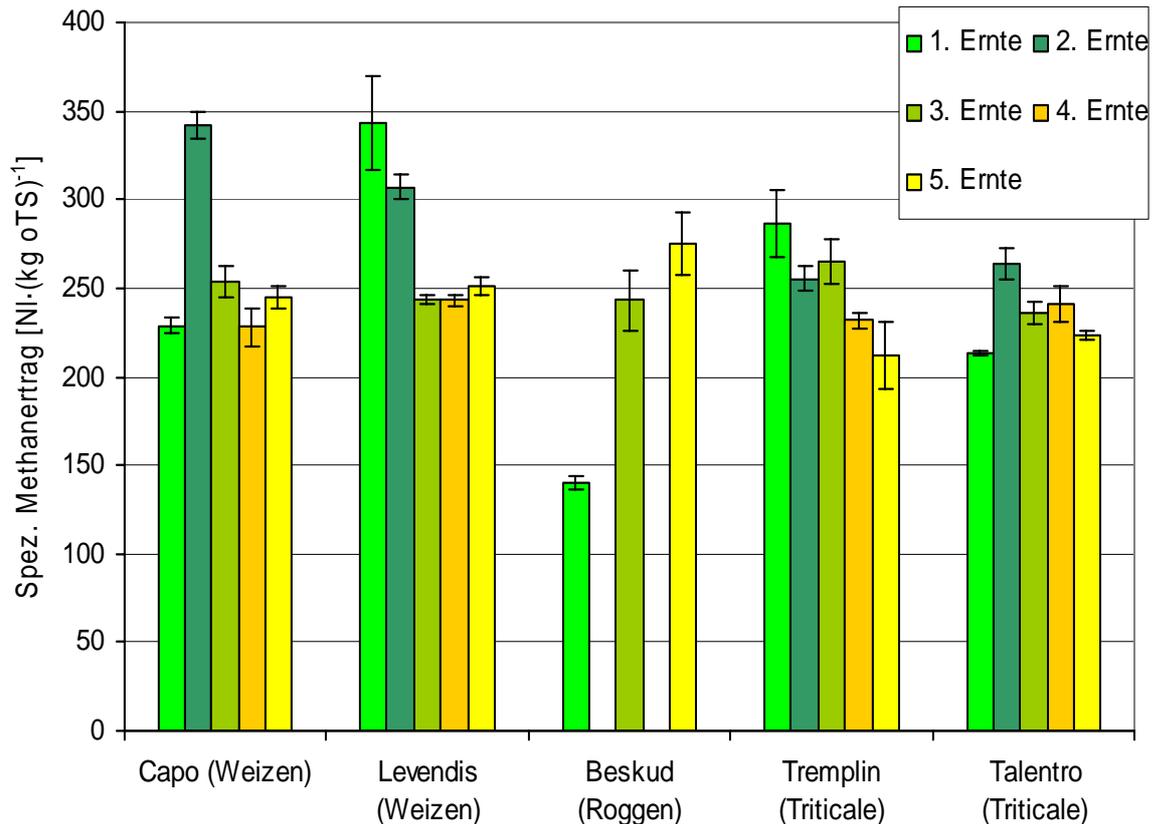


Abbildung 13. Spezifischer Methanertrag verschiedener Getreidesorten

5.1.1.3 Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt des Getreides

Abbildung 14 gibt den Methanhektarertrag ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) der verschiedenen Getreidearten und -sorten wieder. Der Methanhektarertrag wurde aus dem Biomasseertrag (t TM ha^{-1}) der Getreidesorten in Kombination mit ihrem spezifischen Methanertrag ($\text{NI (kg oTS}^{-1})$) ermittelt.

Mit den Triticalesorten (Tremplin und Talentro) wurden maximale Methanhektarerträge schon in den Entwicklungsstadien „Ährenschieben“ (2. Ernte) bzw. „Milchreife“ (3. Ernte) erreicht. Triticale der Sorte Tremplin erreichte den maximalen Methanhektarertrag von $3.581 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ Ende Juni im Stadium der „Milchreife“ (3. Ernte), während auf demselben Standort die Sorte Talentro den maximalen Methanhektarertrag von $3686 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ schon Anfang Juni im Vegetationsstadium „Ährenschieben“ (2. Ernte) erreichte.

Die Weizensorten Capo und Levendis wie auch die Roggensorte Beskud zeigten erst zum Ende der Vegetationsphase (5. Ernte) die höchsten Methanhektarerträge. Beim Weizen wurden je nach Sorte maximale Methanhektarerträge von 4002 (Levendis) und $4415 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ (Capo) erzielt.

Vergleicht man die Höhe der Methanerträge miteinander, so zeigt sich, dass mit Silagen aus Roggen und Triticale ähnlich hohe Methanhektarerträge zu erzielen sind. Der maximale Methanhektarertrag, der mit den beiden Weizensorten erzielt wurde, lag aber noch um gut 15 % über dem des Roggens und der zwei Triticalesorten.

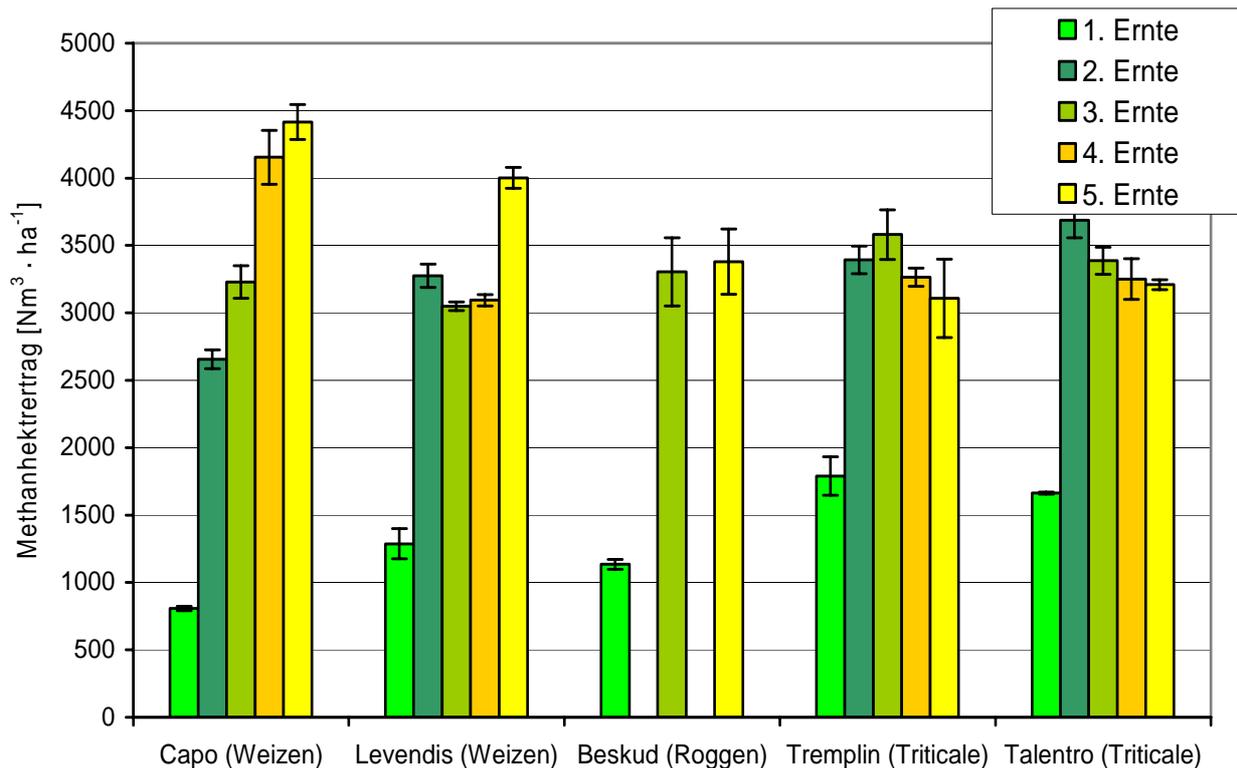


Abbildung 14. Methanhektarertrag verschiedener Getreidesorten

Um eine Aussage über den optimalen Erntezeitpunkt der verschiedenen Getreidesorten machen zu können, muss neben dem Methanhektarertrag auch der Trockenmassegehalt der Biomasse berücksichtigt werden. Nur mit TM-Gehalten von 30 bis 35 % lässt sich eine optimale Silierung der Biomasse erzielen. Ein darunter liegender Trockenmassegehalt würde zu hohe Sickerwasser und Silierverluste verursachen und ein darüber liegender Trockenmassegehalt den Silierprozess hemmen.

Aufgrund des Trockenmassegehaltes der Biomasse lassen sich für die im vorliegenden Projekt untersuchten Getreidesorten die folgenden, optimalen Erntezeitpunkte ableiten:

- Ernte im Vegetationsstadium „Milchreife der Körner“ (3. Ernte): Capo und Beskud
- Ernte im Vegetationsstadium „Teigreife der Körner“ (4. Ernte): Levendis, Tremplin und Talentro

Da der optimale Erntezeitpunkt von Capo und Beskud noch vor der „Teigreife der Körner“ (4. Ernte) liegt, eignen sich diese beiden Sorten auch zum Anbau als Vorfrucht. Zum optimalen Erntezeitpunkt der Getreideganzpflanzen würden mit den Silagen der Roggensorte Beskud die höchsten Methanhektarerträge erzielt werden.

5.1.2 Sonnenblumen

Für die Sonnenblumen wurden die Praxisfeldversuche auf dem Standort der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf angelegt und durchgeführt. Beprobung, Ernte, Aufbereitung, Konservierung, Ertragserfassung und Inhaltsstoffanalysen der Biomasse erfolgten in gleicher Weise und mit demselben Differenzierungsgrad wie für das Getreide.

Im Versuchsprogramm wurden auftragsgemäß die Sonnenblumensorten „PR 63A82“ (Linolsäuretyp) und „PR 64H41“ (Ölsäuretyp) verwendet. Zusätzlich wurden bei der Umsetzung des pflanzenbaulichen Versuchsprogramms die Sonnenblumensorten „PR 64A44“, „Pegasol“, „Alhaja“ und „Alifax RM“ in das Feldversuchsprogramm aufgenommen. Die Durchführung von Feldsortenversuchen ist mit einem hohen Arbeits- und Sachaufwand verbunden. Durch die hohe Motivation und das Interesse der Mitarbeiter der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf am vorliegenden Forschungsprogramm und der zusätzlich in das Projekt eingebrachten Arbeits- und Sachleistungen war mehr als eine Verdoppelung des pflanzenbaulichen Versuchsprogramms bei den Sonnenblumen möglich. Mit der Aufnahme von vier zusätzlichen Sorten zu den ursprünglich geplanten zwei Sorten wurden die Datenbasis und das Ergebnisspektrum des Versuchsprogramms entsprechend gesteigert.

Sämtliche Daten zum Standort (Seehöhe, Niederschlag, Temperatur und Bodentyp) und der Kulturführung (Vorfrucht, Aussattermin, Aussaatstärke, Pflanzenschutz und Düngung) der Sonnenblumen sind nachfolgend in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27. Übersicht über wichtige Daten zum Sonnenblumenstandort und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen

| Sonnenblumensorte | Standort | Seehöhe | Niederschlag und Temperatur im Jahresdurchschnitt | Bodentyp | Vorfrucht | Aussattermin | Körner ha ⁻¹ | Pflanzenschutz | Düngung |
|-------------------|-----------------|---------|---|--------------|-----------|--------------|-------------------------|----------------------------------|---------|
| | | | | | | | | | pro ha |
| PR 63A82 | Groß Enzersdorf | 153 m | 551 mm 9,9 °C | Tscher-nosem | Hafer | 22.04.04 | 65.000 | 2 x hacken 1 x händisch jäten | 120 N |
| PR 64H41 | | | | | | | | | |
| PR 64A44 | | | | | | | | | |
| Pegasol | | | | | | | | | |
| Alhaja | | | | | | | | | |
| Alifax RM | | | | | | | | | |

Die Schlaggröße für jede Sorte betrug 1000 bis 2000 m². Die Sorten PR 63A82 und PR 64H41 wurden genauer untersucht und zu 6 Terminen geerntet. Daten dieser beiden Sorten zu den Erntezeitpunkten, der Vegetationsentwicklung sowie Alter der Sonnenblumensorten zum Erntezeitpunkt sind Tabelle 28 zu entnehmen. Für die zusätzlich im Versuch aufgenommenen Sorten wurden repräsentative Parameter, wie Biomasseertrag zum Erntetermin am 01.09.04 (Vegetationsstadium „Samen sind schwarz“) und spezifischer Biogas- bzw. Methanertrag in diesem Vegetationsstadium erhoben (letzteres nur für die Sorten Alhaja und Pegasol). Diese sind unter den entsprechenden Abschnitten behandelt.

Tabelle 28. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Sonnenblumenbestände zum Erntezeitpunkt¹

| | Sonnenblumensorte | |
|--------------------|-----------------------------------|----------|
| | PR 63A82 | PR 64H41 |
| 1. Ernte | 07.07.04 | |
| Vegetationsstadium | 57 (Erscheinen der Blütenanlagen) | |
| Wachstumstag | 76 | |
| 2. Ernte | 20.07.04 | |
| Vegetationsstadium | 65 (Vollblüte) | |
| Wachstumstag | 89 | |
| 3. Ernte | 26.07.04 | |
| Vegetationsstadium | 65-69 (Vollblüte-Ende der Blüte) | |
| Wachstumstag | 95 | |
| 4. Ernte | 11.08.04 | |
| Vegetationsstadium | 79 (Samen sind grau) | |
| Wachstumstag | 111 | |
| 5. Ernte | 01.09.04 | |
| Vegetationsstadium | 85-86 (Samen sind schwarz) | |
| Wachstumstag | 132 | |
| 6. Ernte | 22.09.04 | |
| Vegetationsstadium | 89 (Vollreife) | |
| Wachstumstag | 153 | |

¹Die Entwicklungsstadien der Sonnenblumen wurden nach der BBCH-Skala definiert.

Die erste Ernte der Sonnenblumensorten erfolgte am 07.07.04 im Vegetationsstadium „Erscheinen der Blütenanlagen“ (ECA-Stadium 57). Das Alter der Bestände betrug zu diesem Zeitpunkt 76 Tage. Die 6. und letzte Ernte erfolgte am 22.09.04. An diesem Termin war das ECA-Stadium 89 („Vollreife“) erreicht. Der Bestand war mit 153 Wachstumstagen ausgereift.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Sonnenblumenbestand im Vegetationsverlauf zu den verschiedenen Ernteterminen.



1 Ernte -76 Wuchstage 57-Erscheinen der Blüten
 2 Ernte -89 Wuchstage 65- Blüte
 3 Ernte -95 Wuchstage 65-69-Sambildung
 4 Ernte -111 Wuchstage 79-Samenreife
 5 Ernte -132 Wuchstage 86-Vollreife

Abbildung 15. Sonnenblumenbestand der Sorte PR 63A82 zu den ersten fünf Ernteterminen (Standort: Groß-Enzersdorf, Niederösterreich)

5.1.2.1 Biomasseertrag der Sonnenblumen

Tabelle 29 zeigt den Verlauf der Ertragsentwicklung der Sonnenblumensorten PR 63A82 und PR 64H41. Dargestellt sind der Frischmasseertrag [t ha^{-1}], der Trockenmassegehalt in der Frischmasse [% FM], der Rohaschegehalt in der Trockenmasse [% TM] und der Trockenmasseertrag [t ha^{-1}] der Sonnenblumensorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. dem Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände.

Tabelle 29. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der Sonnenblumensorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände

| | Sonnenblumensorte | |
|---------------------------|-----------------------------------|----------|
| | PR 63A82 | PR 64H41 |
| 1. Ernte | 57 (Erscheinen der Blütenanlagen) | |
| FM [t ha^{-1}] | 84,4 | 87,4 |
| TM [% FM] | 8,0 | 7,9 |
| Rohasche [% TM] | 85,9 | 85,8 |
| TM [t ha^{-1}] | 6,8 | 6,9 |
| 2. Ernte | 65 (Vollblüte) | |
| FM [t ha^{-1}] | 88,4 | 103,3 |
| TM [% FM] | 11,5 | 10,2 |
| Rohasche [% TM] | 87,4 | 86,4 |
| TM [t ha^{-1}] | 10,1 | 10,5 |

| | Sonnenblumensorte | |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------|
| | PR 63A82 | PR 64H41 |
| 3. Ernte | 65–69 (Vollblüte-Ende der Blüte) | |
| FM [t ha ⁻¹] | 97,5 | 100,2 |
| TM [% FM] | 12,4 | 12,8 |
| Rohasche [% TM] | 88,9 | 87,4 |
| TM [t ha ⁻¹] | 12,1 | 12,9 |
| 4. Ernte | 79 (Samen sind grau) | |
| FM [t ha ⁻¹] | 106,0 | 104,0 |
| TM [% FM] | 15,4 | 15,7 |
| Rohasche [% TM] | 85,8 | 87,6 |
| TM [t ha ⁻¹] | 16,3 | 16,3 |
| 5. Ernte | 85-86 (Samen sind schwarz) | |
| FM [t ha ⁻¹] | 66,7 | 72,8 |
| TM [% FM] | 23,7 | 22,6 |
| Rohasche [% TM] | 89,1 | 87,3 |
| TM [t ha ⁻¹] | 15,8 | 16,4 |
| 6. Ernte | 89 (Vollreife) | |
| FM [t ha ⁻¹] | 46,6 | 40,5 |
| TM [% FM] | 39,3 | 34,3 |
| Rohasche [%TM] | 92,7 | 89,4 |
| TM [t ha ⁻¹] | 18,3 | 13,9 |

FM Frischmasse, TM Trockenmasse

Die Frischmasseerträge der Sonnenblumensorten stiegen bis zur 4. Ernte auf durchschnittlich 105 t ha⁻¹ an, fielen anschliessend dann aber bis zur 6. Ernte auf 41 (PR 64H41) bzw. 47 t ha⁻¹ (PR 63A82) ab. Der Rohaschegehalt der beiden Sonnenblumensorten lag zu Beginn der Vegetation bei durchschnittlich 86 %, am Ende bei 91 %. Im Verlauf der Vegetation stieg der Trockenmassegehalt in der Frischmasse der Sonnenblumen kontinuierlich an. Mit der Sorte PR 63A82 wurde in der 6. Ernte der höchste Trockenmasseertrag mit 18,3 t ha⁻¹ erzielt. Die Sorte PR 64H41 erreichte schon mit der 5. Ernte ihren Höchstertrag von 16,4 t ha⁻¹. Mit Ausnahme des letzten Erntetermins, lagen die Biomasseerträge der Sorte PR 64H41 aber über denen der Sorte PR 63A82 (Abbildung 16).

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung des Biomassehektarertrags in t TM ha⁻¹ der Sonnenblumensorten PR 63A82 und PR 64H41 im Vegetationsverlauf.

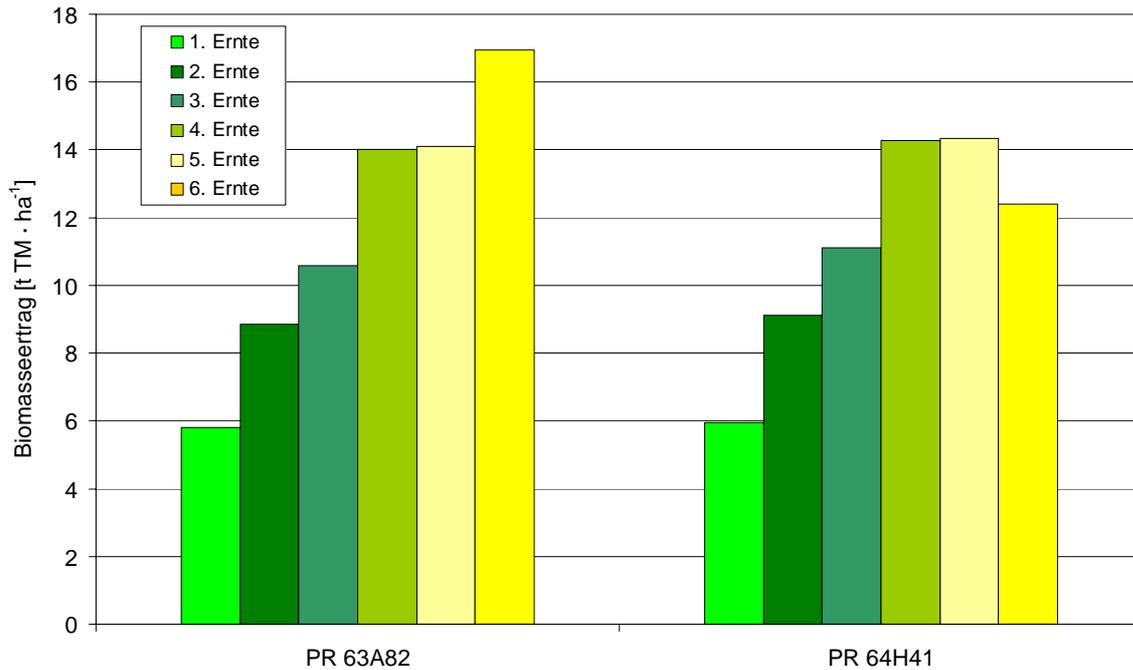


Abbildung 16. Entwicklung des Biomasseertrages der Sonnenblumensorten

In Abbildung 17 sind die Biomasseerträge aller sechs angebauten Sonnenblumensorten bei einer Ernte zum 132. Wachstumstag einander gegenübergestellt. Mit Bewässerung kann mit den Sorten Pegasol und Alhaja die gleiche Ertragsleistung erzielt werden wie mit der Sorte PR 64H41. Die Sorte PR 64A44 lag mit einem TM-Ertrag von $14,5 \text{ t ha}^{-1}$ zwischen den Sorten PR 63A82 ($15,1 \text{ t ha}^{-1}$) und PR 64H41 ($13,6 \text{ t ha}^{-1}$). Der höchste TM-Ertrag konnte mit der Sorte Alifax RM erzielt werden. Er lag bei $17,0 \text{ t ha}^{-1}$. Ohne Bewässerung sanken die Biomasseerträge zum Teil um mehr als 50 %. In dieser Situation konnten nur noch mit den beiden Sorten Alhaja und PR 63A82 ein TM-Ertrag von um die 10 t ha^{-1} erzielt werden. Die Ergebnisse dieses Sortenvergleichs zeigen die Wichtigkeit der standortangepassten Sortenwahl deutlich auf. Durch eine standortangepasste Sortenwahl können die Biomasseerträge von Sonnenblumen um bis zu 50 % gesteigert werden. Bei Anbau von Sonnenblumen in pannonischen Gebieten ist den vorliegenden Untersuchungsergebnissen zufolge nur mit Erträgen von etwa 8 bis 12 t TM ha^{-1} zu rechnen.

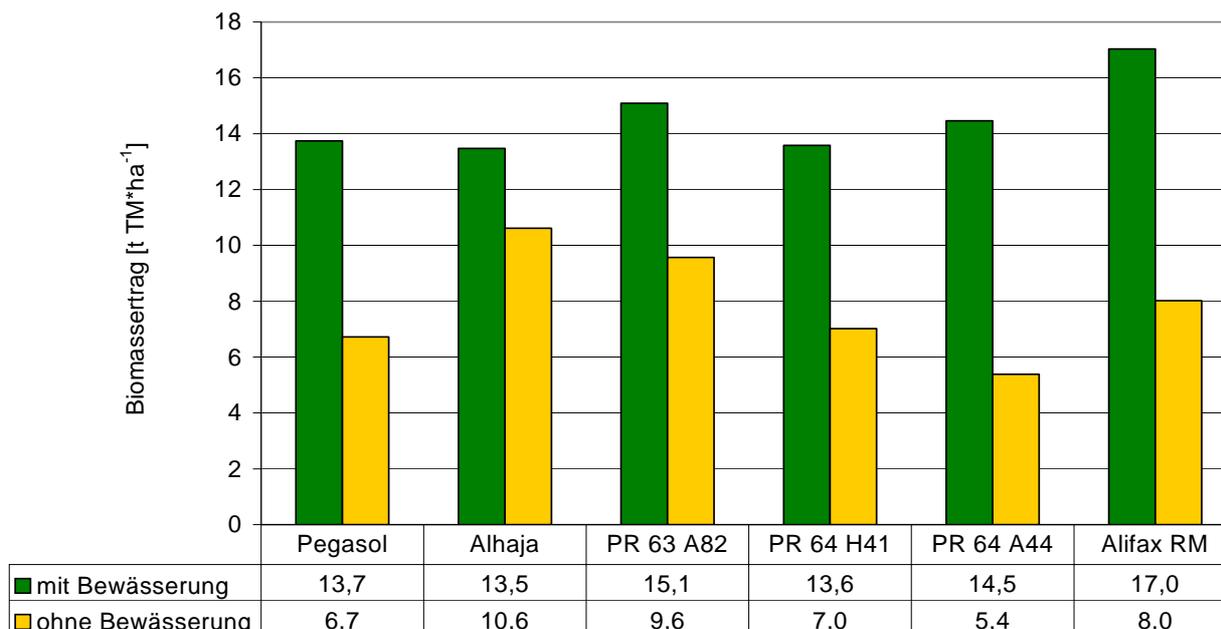


Abbildung 17: Biomasseerträge von Sonnenblumensorten im Vergleich (132. Wachstumstag)

5.1.2.2 Qualität der Sonnenblumensilagen

Für die Sonnenblumensorten PR 63A82 und PR 64H41 wurden Inhaltsstoffanalysen in den Silagen für folgende Parameter durchgeführt: Bruttoenergie (BE), Trockenmasse (TM), Rohasche (XA), organische Masse (oTS), Gesamtstickstoff (N_t), Ammoniumstickstoff (NH_4-N), Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), N-freie Extraktstoffe (XX), Zucker (XZ), Stärke (XS) und Kohlenstoff (C_t). Zusätzlich wurde das C/N- und XP/BE-Verhältnis ermittelt und die spezifische Methanausbeute (CH_4 -Ausbeute) gemessen. Die Ergebnisse der Analysen sind Tabelle 30 zu entnehmen.

Generell nimmt im Verlauf der Vegetation der Gehalt an Trockenmasse (TM) und organischer Trockensubstanz (oTS) in der Biomasse zu. Im vorliegenden Fall lag der TM- und oTS-Gehalt der Sonnenblumensorte PR 63A82 zum Zeitpunkt der sechsten Ernte bei 30,4 und 27,4 %. Mit der Sorte PR 64H41 ergaben sich zum gleichen Zeitpunkt ein etwas höherer Gehalt an TM und oTS (33,8 und 30,2 %). Wie in den Getreidesilagen nahm auch in den Sonnenblumensilagen der Rohproteingehalt (XP) während des Vegetationsverlaufs ab. Zur ersten Ernte ergab sich ein Rohproteingehalt von durchschnittlich 16,4 % in der Trockenmasse, zur letzten Ernte nur noch ein Gehalt von durchschnittlich 5,1 %. Im Gegensatz dazu stieg der Rohfettgehalt (XL) in den Sonnenblumen während des Vegetationsverlaufs an. Für den Rohfettgehalt wurden zur ersten Ernte durchschnittlich 2,5 % ermittelt, am Ende der Vegetationszeit lag der Rohfettgehalt bei durchschnittlich 19,0 %. Parallel dazu erhöhte sich auch der Bruttoenergiegehalt der Sonnenblumensilagen von 17,0 bzw. 20,8 MJ (kg TM)⁻¹ auf 51,6 bzw. 50,2 MJ (kg TM)⁻¹ für PR 63A82 und PR 64H41. Der Rohfasergehalt (XF) erhöhte sich tendenziell von der ersten bis zur sechsten Ernte um 4,4 Prozentpunkte von durchschnittlich 26,3 % auf 30,7 %. Gegenätzlich dazu nahm der Gehalt an N-freien Extraktstoffen (XX) von der ersten bis zur sechsten Ernte um 5,8 Prozentpunkte ab und lag zur sechsten Ernte bei 35,0 %. Der Gehalt an Stärke (XS) und Zucker (XZ) stieg im gleichen Zeitraum aber an. Zur sechsten Ernte hatte PR 63A82 einen Stärke- und Zuckergehalt von 2,4 und 0,5 %, PR 64H41 einen Stärke- und Zuckergehalt

von 1,7 und 0,7 %. Der Gehalt an Rohasche (XA) reduzierte sich im Verlauf der Vegetation von durchschnittlich 14,2 % auf 10,3 %. Der Kohlenstoffgehalt (C_t) erhöhte sich von der ersten bis zur sechsten Ernte um mehr als 10 Prozentpunkte von durchschnittlich 44,2 % auf 56,9 %. Zur gleichen Zeit sank der Stickstoffgehalt (N_t) von 2,7 (PR 63A82) bzw. 4,4 (PR 64H41) auf durchschnittlich 1,4 %. Dadurch erweiterte sich das C/N-Verhältnis für die beiden Sonnenblumensorten von 16,3 (PR 63A82) bzw. 10,1 (PR 64H41) auf 40,9 bzw. 43,2. Durch sinkenden Rohprotein- und steigenden Bruttoenergiegehalt wurde das XP/BE-Verhältnis über den Vegetationsverlauf hin enger, und sank von durchschnittlich 0,9 auf 0,2.

Abbildung 18 zeigt das spezifische Methanbildungsvermögen bzw. den spezifischen Methanertrag (NI (kg oTS^{-1})) der Sonnenblumensorten im Vegetationsverlauf. Die genauen Daten können der Tabelle 30 entnommen werden.

Tabelle 30. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH₄-Ausbeute der Sonnenblumensorten PR 63A82 und PR 64H41 im Vegetationsverlauf

| Sonnenblumen- silage | Ernte | XP | XL | XF | XA | XX | BE | C _t | N _i | NH ₄ -N | XS | XZ | C/N | XP/BE | TM | oTS | CH ₄ - Ausbeute |
|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------|------|------|------|-------|--------------------|------|-------------------------------|
| | | % TM | MJ (kg TM) ⁻¹ | % TM | % TM | %TM | % TM | % TM | % TM | | g MJ ⁻¹ | % FM | % FM |
| PR 63A82 | 1. | 15,2 | 2,6 | 27,1 | 14,1 | 40,9 | 17,0 | 43,9 | 2,7 | 0,3 | 1,7 | 0,0 | 16,3 | 0,9 | 8,0 | 6,9 | 454,0 |
| | 2. | 13,3 | 3,7 | 30,6 | 11,5 | 40,9 | 17,7 | 45,1 | 3,1 | 0,9 | 1,2 | 0,6 | 14,8 | 0,8 | 11,5 | 10,1 | 291,0 |
| | 3. | 11,9 | 2,5 | 28,4 | 12,3 | 45,0 | 17,4 | 44,4 | 2,4 | 0,4 | 1,7 | 0,4 | 18,6 | 0,7 | 12,4 | 10,9 | 252,0 |
| | 4. | 13,2 | 16,1 | 24,1 | 10,1 | 36,5 | 20,8 | 50,5 | 2,6 | 0,5 | 1,2 | 0,4 | 19,4 | 0,6 | 15,4 | 13,9 | 335,0 |
| | 5. | 10,0 | 18,9 | 29,0 | 10,9 | 31,2 | 21,3 | 51,1 | 2,1 | 0,5 | 0,0 | 0,4 | 24,7 | 0,5 | 23,7 | 21,1 | 271,0 |
| | 6. | 5,2 | 18,6 | 31,2 | 9,9 | 35,2 | 51,6 | 57,3 | 1,4 | 0,5 | 2,4 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 30,4 | 27,4 |
| PR 64H41 | 1. | 17,5 | 2,3 | 25,5 | 14,2 | 40,5 | 20,8 | 44,4 | 4,4 | 1,6 | 0,5 | 0,0 | 10,1 | 0,8 | 7,9 | 6,8 | 428,0 |
| | 2. | 14,8 | 3,1 | 25,9 | 12,6 | 43,5 | 17,4 | 44,2 | 2,7 | 0,4 | 1,7 | 0,4 | 16,1 | 0,9 | 10,2 | 8,9 | 206,0 |
| | 3. | 13,9 | 2,7 | 27,5 | 13,2 | 42,7 | 17,3 | 44,4 | 2,8 | 0,6 | 1,2 | 0,4 | 15,7 | 0,8 | 12,8 | 11,1 | 220,0 |
| | 4. | 12,8 | 10,2 | 26,0 | 12,6 | 38,4 | 19,4 | 47,6 | 2,8 | 0,8 | 1,2 | 0,0 | 17,1 | 0,7 | 15,7 | 13,7 | 194,0 |
| | 5. | 10,0 | 15,6 | 30,5 | 12,7 | 31,2 | 20,2 | 48,9 | 2,2 | 0,6 | 1,7 | 0,4 | 22,8 | 0,5 | 22,6 | 19,7 | 154,0 |
| | 6. | 5,0 | 19,5 | 30,2 | 10,6 | 34,7 | 50,2 | 56,2 | 1,3 | 0,5 | 1,7 | 0,7 | 39,2 | 0,2 | 33,8 | 30,2 | 190,0 |

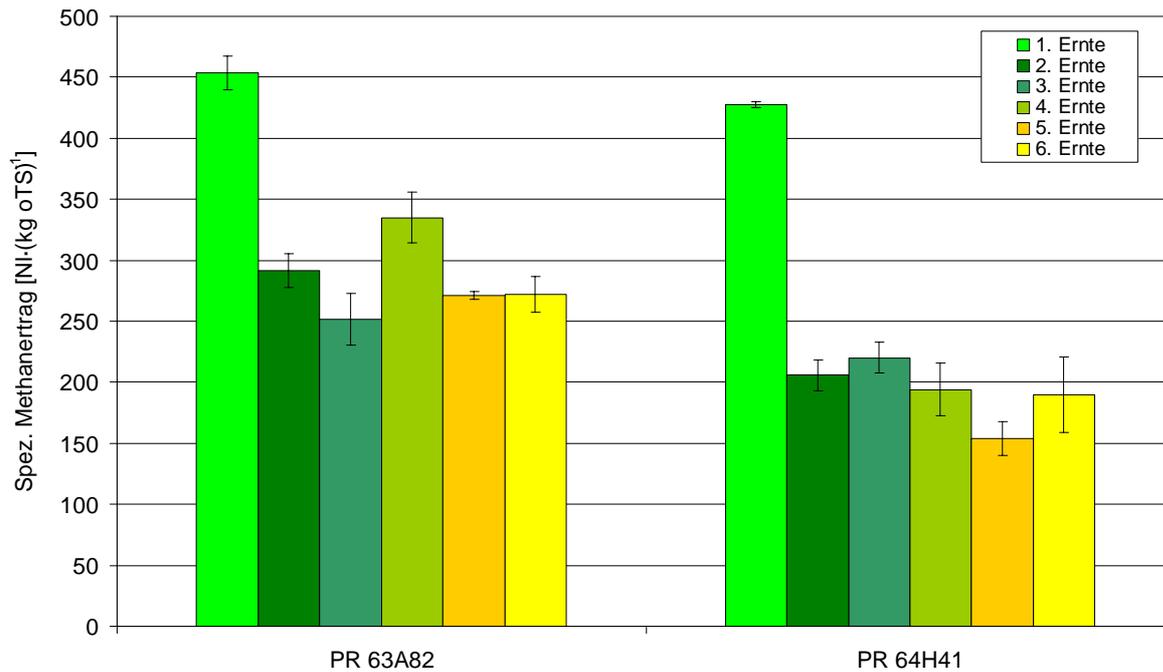


Abbildung 18. Spezifischer Methanertrag der Sonnenblumensorten

Das spezifische Methanbildungsvermögen der beiden Sonnenblumensilagen PR 63A82 und PR 64H41 lag zum Zeitpunkt der 1. Ernte (Vegetationsstadium „Erscheinen der Blütenanlagen“) bei $454 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ bzw. $428 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$. Damit wurde schon zu Beginn der Vegetation für beide Sorten der höchste spezifische Methanertrag erreicht. Zum Zeitpunkt des Vegetationsstadiums „Vollblüte“ (2. Ernte) war der spezifische Methanertrag auf ein deutlich niedrigeres Niveau abgesunken und lag bei $291 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ bzw. $206 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$. Im weiteren Vegetationsverlauf stieg der spezifische Methanertrag bei der Sorte PR 64H41 nicht mehr wesentlich an. Zum Zeitpunkt der sechsten Ernte („Vollreife“) wurde für PR 64H41 ein spezifischer Methanertrag von $190 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ ermittelt. Generell gesehen lag der spezifische Methanertrag der Sorte PR 63A82 zu jedem Zeitpunkt während der gesamten Vegetationsphase über denen von PR 64H41. Im Gegensatz zu PR 64H41 erhöhte sich der spezifische Methanertrag von PR 63A82 noch einmal zum Vegetationsstadium „Samen sind grau“ (4. Ernte) auf 335 NI (kg oTS) . Zum Zeitpunkt der „Vollreife“ (6. Ernte) wurde ein spezifischer Methanertrag von $272 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ ermittelt.

Für zwei zusätzliche Sonnenblumensorten (Alhaja und Pegasol) wurde zum Zeitpunkt der fünften Ernte ebenfalls der spezifische Methanertrag ermittelt. Es wurde festgestellt, dass mit der Sorte Alhaja der gleiche Methanertrag ($271 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$) erzielt werden konnte wie für PR 63A82. Mit der Sorte Pegasol wurde ein spezifischer Methanertrag von $221 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ ermittelt, der zwischen PR 63A82 und PR 64H41 lag. Der hohe spezifische Methanertrag weist die Sonnenblumensorte Alhaja als eine sehr interessante Energiepflanze aus. Weiterführende Untersuchungen mit dieser Sonnenblumensorte wären daher sehr wichtig.

5.1.2.3 Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt

Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Methanhektarerträge ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) der Sonnenblumensorten zu den unterschiedlichen Ernteterminen.

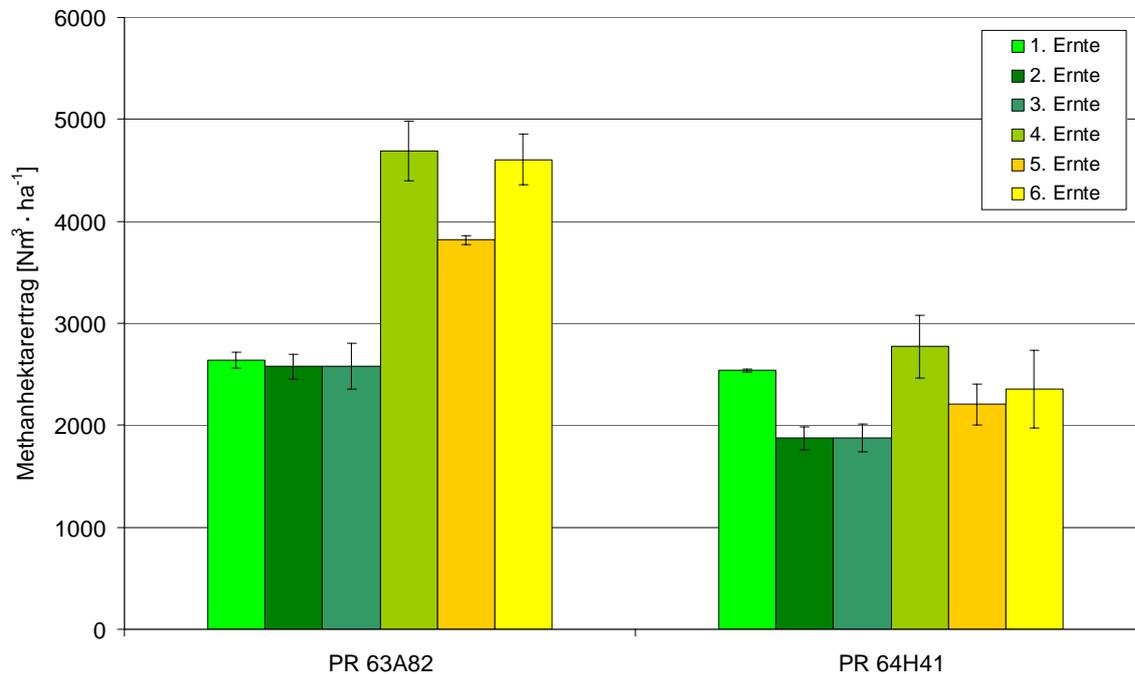


Abbildung 19. Methanhektarertrag der Sonnenblumensorten

Obwohl der spezifische Methanertrag von PR 63A82 zu Beginn der Vegetation am höchsten war (Abbildung 18), wurden die höchsten Methanhektarerträge zur 4. bzw. 6. Ernte ermittelt. Dies lag darin begründet, dass der Biomasseertrag von PR 63A82 im Verlauf der Vegetation immer weiter angestiegen ist (Abbildung 16). Obwohl in den ersten fünf Ernten mit der Sorte PR 64H41 ähnliche Biomasseerträge wie mit PR 63A82 erzielt wurden, lag der Methanhektarertrag aufgrund des generell niedrigeren spezifischen Methanertrages dieser Sorte zu jedem Zeitpunkt unter denen von PR 63A82. Wie für PR 63A82 wurde auch für PR 64H41 im Vegetationsstadium „Samen sind grau“ (4. Ernte) der höchste Methanhektarertrag ermittelt, nur das im Vergleich zu PR 64H41 mit $2.600 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$ der Methanhektarertrag der Sorte PR 63A82 mit $4.550 \text{ Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$ fast doppelt so hoch lag. Inwieweit die Methanertragsunterschiede auf das unterschiedliche Fettsäuremuster der Sonnenblumen zurückzuführen ist, müsste in weiterführenden Untersuchungen abgeklärt werden. Auch die Untersuchung der Rohfaserkomponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin wäre in diesem Zusammenhang von grosser Relevanz.

Auch für Sonnenblumenganzpflanzen gilt, dass nur mit einem Trockenmassegehalt zwischen 30 und 35 % eine optimale Silierung erreicht werden kann. Dadurch lassen sich für die beiden im vorliegenden Projekt untersuchten Sonnenblumensorten folgende optimale Erntezeitpunkte ableiten:

- Ernte im Vegetationsstadium „Samen sind schwarz“ (5. Ernte): PR 63A82
- Ernte im Vegetationsstadium „Vollreife“ (6. Ernte): PR 64H41

Aufgrund ihres hohen Methanhektarertrages eignet sich die Sonnenblumensorte PR 63A82 besonders zum Anbau als Energiepflanze. Zum Zeitpunkt der optimalen Ernte übertrifft PR 63A82 auch die Methanhektarerträge der Getreideganzpflanzen.

5.1.3 Wiesen gras

Das pflanzenbauliche Versuchsprogramm zur Ermittlung des Methanbildungspotenzials von Wiesen gras wurde von der HBLFA Raumberg-Gumpenstein durchgeführt. Auf den Standorten „Admont-Buchau“ und „Gumpenstein-Irdning“ im Ennstal wurden insgesamt 16 Wiesen grasvarianten beprobt. Die Versuchsanlage und die Beprobung der Bestände wurden so gestaltet, dass eine Differenzierung der Versuchsergebnisse nach der Bewirtschaftungsintensität (Schnittnutzungshäufigkeit), dem Entwicklungsstadium der Wiesen grasbestände zum Zeitpunkt der Ernte (Schossen, Ähren-/Rispschieben, Blüte, Überständig) und der Art der Konservierung (keine/frisch und Silierung) möglich war.

Das Versuchsprogramm zum Wiesen gras konnte im Vergleich zum ursprünglichen Antragsvolumen um mehr als das Dreifache erweitert werden. Die Erweiterung des Versuchsprogramms war durch den überproportional hohen Einsatz der am Projekt beteiligten Mitarbeiter/innen und durch den zusätzlichen Sachmitteleinsatz der HBLFA Raumberg-Gumpenstein möglich.

Für das Wiesen gras erfolgte die Ergebnisdarstellung sowie der Umfang der Inhaltsstoffanalytik in ähnlicher Weise wie für alle vorhergehenden Energiepflanzen.

Tabelle 31 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Daten zu den beiden Wiesen grasstandorten Admont-Buchau und Gumpenstein-Irdning im Ennstal.

Tabelle 31. Übersicht über wichtige Daten zu den Wiesen grasstandorten und die Kulturführung im Feldversuch

| | Standort | Seehöhe | Niederschlag und Temperatur im Jahresdurchschnitt | Bodentyp | Vorfrucht | Anbaujahr | Pflanzenschutz | Düngung |
|-------------|---------------------|---------|---|-----------|---------------------|-----------|----------------|--------------------------|
| | | | | | | | | pro ha |
| Wiesen gras | Admont-Buchau | 890 m | 1250 mm 6,1°C | Braunlehm | Mehrjährige Nutzung | ≈1900 | – | Rinderkompost 12–19 t |
| Wiesen gras | Gumpenstein-Irdning | 710 m | 1019 mm 6,9°C | Braunerde | Mehrjährige Nutzung | 2000 | – | Rinderkompost 20 t |

Die Wiesen grasstandorte Admont-Buchau und Gumpenstein-Irdning stellen für die alpenländische Landwirtschaft in Österreich typische Grünlandstandorte dar. Die Standorte unterscheiden sich im Bodentyp, der Seehöhe, dem Jahresniederschlag und der durchschnittlichen Jahrestemperatur. Der Wiesen grasstandort Admont-Buchau liegt auf 890 m Seehöhe, 180 m über dem Wiesen grasstandort Gumpenstein-Irdning. Am Standort Admont-Buchau liegt die jährliche Niederschlagsmenge um 231 mm höher und die Jahresdurchschnittstemperatur um 0,8°C niedriger im Vergleich zum Standort Gumpenstein-Irdning. Die Versuchsflächen wurden standort- und ertragsangepasst mit Rinderkompost gedüngt. Während der Versuchsphase wurden keine Pflanzenschutzmassnahmen durchgeführt.

Informationen über die beiden Versuchsstandorte hinsichtlich Variantenbezeichnung, Bewirtschaftungsintensität der Wiesen grasbestände, der Aufwüchse, der jeweiligen Schnittzeitpunkte, des Vegetationsstadiums der Wiesen grasbestände zum Zeitpunkt der Ernte und der Wuchshöhe der Bestände sind in Tabelle 32 und Tabelle 33 zusammengefasst. Aufgrund der klimati-

schen und standortbedingten Gegebenheiten war die Nutzungsintensität (Schnitthäufigkeit) der Wiesengrasbestände des Standortes Gumpenstein-Irdning (intensiver Standort) höher als die des Standortes Admont-Buchau (extensiver Standort). Wie aus Tabelle 32 und Tabelle 33 hervorgeht, wurden im vorliegenden Projekt insgesamt 16 Varianten von Wiesengrasbeständen von extensiver bis intensiver Nutzungsintensität im Hinblick auf ihre Ertragsleistung geprüft. Informationen zum Gräser-, Leguminosen- und Kräuteranteil der Bestände befinden sich in Tabelle 96 und Tabelle 97 im Anhang.

Tabelle 32. Variantenbezeichnung, Bewirtschaftungsintensität, Aufwuchs, Schnittzeitpunkt, Vegetationsstadium und Wuchshöhe der Wiesengrasbestände am extensiven Standort Buchau-Admont

| Buchau-Admont | | | | | |
|----------------------|----------------------------|----------|------------------|---------------------------------|-----------|
| Variantenbezeichnung | Bewirtschaftungsintensität | Aufwuchs | Schnittzeitpunkt | Vegetationsstadium ¹ | Wuchshöhe |
| | Aufwüchse pro Jahr | | Datum | | cm |
| Ex-1-1A | 1 | 1. | 30.08.04 | 4 | 69 |
| Ex-2-1A | 2 | 1. | 05.07.04 | 3 | 78 |
| Ex-2-2A | 2 | 2. | 11.10.04 | 2 | 47 |
| Ex-3-1A | 3 | 1. | 09.06.04 | 2 | 48 |
| Ex-3-2A | 3 | 2. | 29.07.04 | 2-3 | 28 |
| Ex-3-3A | 3 | 3. | 11.10.04 | 2 | 22 |

¹Vegetationsstadien: 1 = Schossen, 2 = Ährenschieben, 3 = Blüte, 4 = Überständig

Auf dem Standort Buchau-Admont wurden die einzelnen Aufwüchse von Ein-, Zwei- und Dreischnittwiesen im Jahresverlauf beprobt. Auf diese Weise konnte Biomasse unterschiedlichster Qualität für die nachfolgenden Gärversuche gewonnen werden. Mit dem gewählten Versuchsdesign wurde die Basis für detaillierte und systematische Untersuchungen zur Frage des Einflusses der Bewirtschaftungsintensität auf den Biomasse- und Methanertrag pro Hektar gelegt.

Am intensiver genutzten Talstandort Gumpenstein-Irdning wurden von den Wiesen drei bis vier Schnitte pro Jahr geerntet (Tabelle 33). Bei einer Bewirtschaftungsintensität von 3 Aufwüchsen pro Jahr wurde zusätzlich zwischen einem frühen (F) und einem späten (S) Schnittzeitpunkt unterschieden. Während zum Beispiel die Variante Int-F-3 am 01.06.2004 das erste Mal geschnitten wurde, fand der erste Schnitt für die Variante Int-S-3 erst am 15.06.2004 statt, d.h. zwei Wochen später.

Tabelle 33. Variantenbezeichnung, Bewirtschaftungsintensität, Aufwuchs, Schnittzeitpunkt, Vegetationsstadium und Wuchshöhe der Wiesengrasbestände am intensiver genutzten Standort Gumpenstein-Irdning

| Gumpenstein-Irdning | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|----------|------------------|---------------------------------|-----------|
| Variantenbezeichnung ² | Bewirtschaftungsintensität | Aufwuchs | Schnittzeitpunkt | Vegetationsstadium ¹ | Wuchshöhe |
| | Aufwüchse pro Jahr | | Datum | | cm |
| Int-4-1A | 4 | 1. | 18.05.04 | 1-2 | 46 |
| Int-4-2A | 4 | 2. | 06.07.04 | 2 | 62 |
| Int-4-3A | 4 | 3. | 09.09.04 | 2 | 68 |
| Int-4-4A | 4 | 4. | 30.09.04 | 1 | 19 |
| Int-F-3-1A | 3 | 1. | 01.06.04 | 2 | 44 |
| Int-F-3-2A | 3 | 2. | 22.07.04 | 2-3 | 64 |
| Int-F-3-3A | 3 | 3. | 27.09.04 | 1-2 | 61 |
| Int-S-3-1A | 3 | 1. | 15.06.04 | 2-3 | 52 |
| Int-S-3-2A | 3 | 2. | 03.08.04 | 3 | 59 |
| Int-S-3-3A | 3 | 3. | 10.10.04 | 1 | 62 |

¹ Vegetationsstadien: 1 = Schossen, 2 = Ährenschieben, 3 = Blüte, 4 = Überständig (abgeblüht)

² F = Varianten mit früheren Erntezeitpunkten, S = Varianten mit späteren Erntezeitpunkten

5.1.3.1 Biomasseertrag des Wiesengrases

Tabelle 34 und Tabelle 35 zeigen den Verlauf der Ertragsentwicklung der extensiv und intensiv genutzten Wiesenbestände. Dargestellt sind der Frischmasseertrag pro Hektar, der Trockenmassegehalt in der Frischmasse, der Rohaschegehalt in der Trockenmasse und der Trockenmasseertrag pro Hektar für die verschiedenen Wiesengrasaufwüchse.

Tabelle 34. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der verschiedenen Wiesengrasaufwüchse am extensiven Standort Buchau-Admont

| Buchau-Admont | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Variante | Frischmasseertrag | Trockenmassegehalt | Rohaschegehalt | Trockenmasseertrag |
| | t ha ⁻¹ | % FM | % TM | t ha ⁻¹ |
| Ex-1-1A | 19,2 | 22,1 | 12,9 | 4,2 |
| Summe | | | | 4,2 |
| Ex-2-1A | 22,8 | 16,8 | 10,7 | 3,8 |
| Ex-2-2A | 15,7 | 16,0 | 14,3 | 2,5 |
| Summe | | | | 6,3 |
| Ex-3-1A | 16,1 | 16,5 | 18,8 | 2,6 |
| Ex-3-2A | 11,7 | 15,1 | 15,3 | 1,8 |
| Ex-3-3A | 10,5 | 14,4 | 13,3 | 1,5 |
| Summe | | | | 5,9 |

FM Frischmasse, TM Trockenmasse

Auf dem höher gelegenen, extensiven Wiesengrasstandort Buchau-Admont wurde bei der niedrigsten Bewirtschaftungsintensität (ein Aufwuchs pro Jahr) eine Ertragsleistung von 4,2 t TM ha⁻¹ erzielt. Bei 2 Aufwüchsen pro Jahr lag die Gesamtertragsleistung bei 6,4 t TMha⁻¹. Eine Erhöhung der Bewirtschaftungsintensität von 2 auf 3 Aufwüchsen pro Jahr steigerte auf diesem Standort die Gesamtertragsleistung nicht weiter und zeigte damit die Grenzen des natürlichen Produktionspotenzials auf diesem extensiven Standort auf. Die Gesamtleistung bei 3 Aufwüchsen pro Jahr lag bei 5,9 t TM ha⁻¹.

Tabelle 35. Frischmasseeertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseeertrag der verschiedenen Wiesengrasaufwüchse am intensiveren Standort Gumpenstein-Irdning

| Gumpenstein-Irdning | | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------------|
| Variante | Frischmasseeertrag | Trockenmassegehalt | Rohaschegehalt | Trockenmasseeertrag |
| | t ha ⁻¹ | % FM | % TM | t ha ⁻¹ |
| Int-4-1A | 15,7 | 15,9 | 10,5 | 2,5 |
| Int-4-2A | 23,7 | 15,6 | 9,7 | 3,7 |
| Int-4-3A | 22,2 | 17,1 | 10,6 | 3,8 |
| Int-4-4A | 1,9 | 12,1 | k.A. | 0,2 |
| Summe | | | | 10,2 |
| Int-F-3-1A | 23,7 | 15,2 | 9,3 | 3,6 |
| Int-F-3-2A | 20,8 | 17,0 | 9,9 | 3,5 |
| Int-F-3-3A | 22,7 | 14,3 | 10,2 | 3,3 |
| Summe | | | | 10,4 |
| Int-S-3-1A | 25,0 | 20,7 | 10,4 | 5,2 |
| Int-S-3-2A | 18,5 | 16,5 | 9,8 | 3,1 |
| Int-S-3-3A | 21,5 | 14,5 | 10,6 | 3,1 |
| Summe | | | | 11,4 |

FM Frischmasse, TM Trockenmasse

Am Standort Gumpenstein-Irdning wurden in günstiger Tallage 3- und 4-schnittige Nutzungssysteme in ihrer Ertragsbildung vergleichend untersucht. Im 4-schnittigen Nutzungssystem wurde eine TM-Ertragsleistung von 10,2 t Wiesengras pro ha und Jahr erzielt. Bei gleichen Standortbedingungen und Düngungsintensität wurde durch den Übergang vom 4- zum 3-schnittigen Nutzungssystem 0,2 t bzw. 1,2 t Wiesengras pro ha mehr gebildet. Dies zeigt deutlich, dass auf diesem Standort trotz vergleichsweise günstiger Wachstumsbedingungen mit 4 Schnitten pro Jahr bereits eine gewisse Übernutzung vorlag und im vierten Aufwuchs nur mehr eine sehr niedrige Ertragsleistung erzielt werden konnte. Die Wahl des Schnittzeitpunkts (früh oder spät) hatte im Dreischnittsystem einen entscheidenden Einfluss auf die TM-Gesamtertragsleistung. Es zeigte sich, dass die Variante mit spätem Schnittzeitpunkt zu Beginn der Vegetationsphase im Frühsommer deutlich mehr Biomasse im 1. Schnitt bilden konnte (5,2 t TM ha⁻¹), als dies bei der Variante mit frühem Schnittzeitpunkt der Fall war (3,6 t TM ha⁻¹). In der Variante mit frühem Schnittzeitpunkt konnte der niedrigere Ertrag zum ersten Schnittzeitpunkt durch die Erträge der nachfolgenden Ernten nicht mehr kompensiert werden. Dies zeigt, dass die Wahl des Schnittzeitpunkts für den ersten Aufwuchs die Ertragsentwicklung der Wiesen für den Zeitraum der gesamten Vegetation festlegt.

Abbildung 20 stellt die Biomasseerträge der extensiv und intensiv genutzten Wiesengrasbestände graphisch dar.

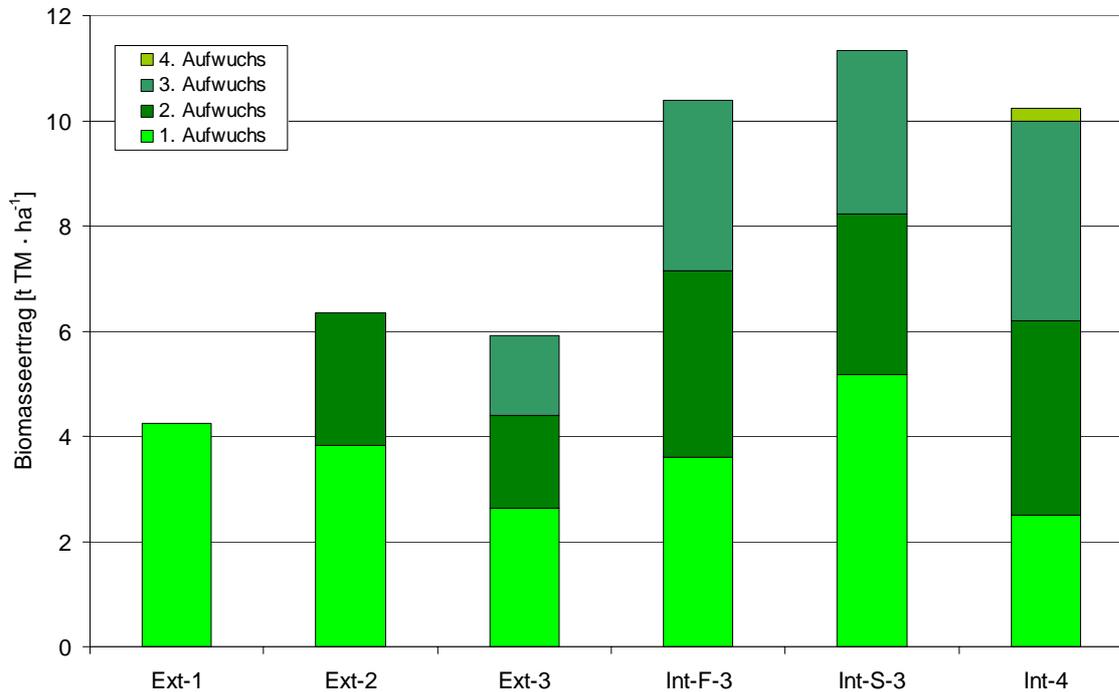


Abbildung 20: Biomasseerträge der unterschiedlich genutzten Wiesengrasbestände

5.1.3.2 Qualität der Wiesengrassilagen

Die Inhaltsstoffzusammensetzung und Energiegehalte der Gärrohstoffe des extensiven Grünlandes im frischen, nicht silierten Zustand und in Form von Silagen wird in Tabelle 36 dokumentiert. Das Methanbildungsvermögen (CH_4 -Ausbeute) wurde für alle Silagen ermittelt. Um eine Referenz für das Methanbildungsvermögens von frischer, nicht silierte Biomasse zu erhalten, wurde das Methanbildungsvermögen der Variante Ex-3-2A zusätzlich auch in der frischen Probe bestimmt.

Im Vergleich zu den 3-schnittigen extensiven Varianten zeigten die 1- und 2-schnittigen extensiven Varianten höhere Rohfasergehalte und niedrigere Rohprotein- und Rohfettgehalte. Das C/N-Verhältnis war in den 3-schnittigen extensiven Varianten enger als in den 1- und 2-schnittigen extensiven Varianten. Diese Unterschiede beruhen darauf, dass die Aufwüchse der 3-schnittigen Varianten in den Vegetationsstadien 2–3 geerntet wurden, die der 1- und 2-schnittigen extensiven Varianten aber zu meist etwas später bis zum Vegetationsstadium 4. Die Silagevariante Ex-3-1A wies den höchsten Rohproteingehalt und den niedrigsten Rohfasergehalt auf. Für diese Variante wurde auch der höchste spezifische Methanertrag mit $221 \text{ NI (kg oTS)}^{-1}$ ermittelt. Im Gehalt an Rohasche, N-freie Extraktstoffe und Bruttoenergie gab es zwischen den Varianten keine systematischen Unterschiede.

Tabelle 36. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH₄-Ausbeute der extensiv genutzten Wiesen bei Verwendung von frischen und silierten Proben (Standort Buchau-Admont)

| Variante | XP | XL | XF | XA | XX | C _t | BE | N _t | NH ₄ | C/N | TM | oTS | CH ₄ -Ausbeute |
|-----------------|------|------|------|------|------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------|------|------|------|---------------------------|
| | % TM | MJ (kg TM) ⁻¹ | % TM | % TM | | % FM | % FM | NI (kg oTS) ⁻¹ |
| Frische Proben | | | | | | | | | | | | | |
| Ex-1-1A frisch | 13,8 | 1,5 | 23,7 | 14,4 | 46,6 | – | 18,3 | 2,2 | 0,3 | – | 22,0 | 18,9 | – |
| Ex-2-1A frisch | 11,3 | 1,5 | 25,3 | 10,5 | 51,5 | – | 18,7 | 2,1 | 0,3 | – | 16,8 | 15,0 | – |
| Ex-2-2A frisch | 14,2 | 1,8 | 23,5 | 11,4 | 49,1 | – | 18,3 | 2,5 | 0,2 | – | 16,0 | 14,2 | – |
| Ex-3-1A frisch | 15,4 | 2,1 | 19,6 | 9,2 | 53,6 | – | 19,0 | 2,7 | 0,5 | – | 16,5 | 14,9 | – |
| Ex-3-2A frisch | 18,2 | 2,1 | 16,8 | 13,6 | 49,3 | – | 17,9 | 2,8 | 0,5 | – | 15,1 | 13,0 | 162 |
| Ex-3-3A frisch | 18,4 | 2,1 | 18,4 | 11,3 | 49,8 | – | 18,6 | 2,4 | 0,3 | – | 14,4 | 12,8 | – |
| Silierte Proben | | | | | | | | | | | | | |
| Ex-1-1A Silage | 14,4 | 2,8 | 33,6 | 12,9 | 36,3 | 44,6 | 18,3 | 2,2 | 0,3 | 20,5 | 18,0 | 15,7 | 153 |
| Ex-2-1A Silage | 12,2 | 2,9 | 34,8 | 10,7 | 39,4 | 47,2 | 18,7 | 2,1 | 0,2 | 22,8 | 16,8 | 15,0 | 171 |
| Ex-2-2A Silage | 14,9 | 2,5 | 31,0 | 14,3 | 37,2 | 44,5 | 18,3 | 2,7 | 0,3 | 16,7 | 14,4 | 12,3 | 128 |
| Ex-3-1A Silage | 20,6 | 2,1 | 26,1 | 18,8 | 32,4 | 46,7 | 19,0 | 2,8 | 0,3 | 16,7 | 8,2 | 6,7 | 221 |
| Ex-3-2A Silage | 18,7 | 4,1 | 26,9 | 15,3 | 35,0 | 45,6 | 18,6 | 3,2 | 0,4 | 14,4 | 12,4 | 10,5 | 167 |
| Ex-3-3A Silage | 18,4 | 3,8 | 26,2 | 13,3 | 38,2 | 45,6 | 18,6 | 3,4 | 0,4 | 13,4 | 13,7 | 11,8 | 152 |

Tabelle 37 zeigt die Gehalte an Inhaltsstoffe und die spezifische CH₄-Ausbeute der Gärrohstoffe, die von den intensiveren Wiesen der Tallagen gewonnen wurden. Die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe wurde für alle Proben, sowohl für frische als auch silierte, durchgeführt. Die spezifische CH₄-Ausbeute wurde für alle Silageproben bestimmt, aus den frischen Proben jedoch nur für die Varianten Int-4-2A und Int-4-4A. Mit Ausnahme eines höheren Gehaltes an Rohfett und Rohasche in den frischen Proben aus dem 4-schnittigen System, gab es keine systematischen Unterschiede zwischen den Varianten des 3- und 4-schnittigen Systems. Mit 392 NI CH₄ (kg oTS)⁻¹ wurde für die Silagevariante In-4-2A der höchste spezifische Methanertrag ermittelt. Im Durchschnitt lag die spezifische CH₄-Ausbeute der intensiv genutzten Wiesenbestände über denen der extensiv genutzten Wiesenbestände (Abbildung 21).

Tabelle 37. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH₄-Ausbeute der intensiver genutzten Wiesen bei Verwendung von frischen und silierten Proben (Standort Gumpenstein-Irdning)

| Variante | XP | XL | XF | XA | XX | C _t | BE | N _t | NH ₄ | C/N | TM | oTS | CH ₄ -Ausbeute |
|-------------------|------|------|------|------|------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------|------|------|------|---------------------------|
| | % TM | MJ (kg TM) ⁻¹ | % TM | % TM | | % FM | % FM | NI (kg oTS) ⁻¹ |
| Frische Proben | | | | | | | | | | | | | |
| Int-4-1A frisch | 17,6 | 2,5 | 21,0 | 9,5 | 49,5 | – | 19,6 | 2,8 | 0,2 | – | 15,9 | 14,4 | – |
| Int-4-2A frisch | 16,4 | 2,6 | 27,5 | 9,7 | 43,8 | – | 19,2 | 2,2 | 0,2 | – | 15,6 | 14,1 | 196 |
| Int-4-3A frisch | 14,5 | 2,5 | 30,9 | 9,2 | 42,8 | – | 19,4 | 2,6 | 0,3 | – | 17,1 | 15,6 | – |
| Int-4-4A frisch | 22,8 | 2,9 | 24,2 | 10,3 | 39,7 | 47,5 | 19,2 | 5,1 | 0,4 | 9,4 | 12,1 | 10,9 | 351 |
| Int-F-3-1A frisch | 19,5 | 2,4 | 23,7 | 8,6 | 45,8 | – | 19,5 | 2,3 | 0,3 | – | 15,2 | 13,9 | – |
| Int-F-3-2A frisch | 14,7 | 1,8 | 31,1 | 8,2 | 44,1 | – | 19,5 | 3,0 | 0,3 | – | 17,0 | 15,6 | – |
| Int-F-3-3A frisch | 14,4 | 2,1 | 31,9 | 9,1 | 42,4 | – | 19,3 | 2,6 | 0,4 | – | 14,3 | 13,0 | – |
| Int-S-3-1A frisch | 13,5 | 2,0 | 27,4 | 7,2 | 49,9 | – | 19,1 | 2,1 | 0,2 | – | 20,7 | 19,2 | – |
| Int-S-3-2A frisch | 15,9 | 2,4 | 31,2 | 9,4 | 41,0 | – | 19,5 | 2,4 | 0,3 | – | 16,5 | 14,9 | – |
| Int-S-3-3A frisch | 13,7 | 2,3 | 29,4 | 9,1 | 45,6 | – | 18,6 | 2,5 | 0,3 | – | 14,5 | 13,2 | – |
| Silierte Proben | | | | | | | | | | | | | |
| Int-4-1A Silage | 16,6 | 3,8 | 26,9 | 10,5 | 42,2 | 49,4 | 19,6 | 3,4 | 0,4 | 14,4 | 28,5 | 25,5 | 257 |
| Int-4-2A Silage | 16,3 | 4,0 | 28,0 | 9,7 | 42,0 | 47,1 | 19,2 | 2,8 | 0,3 | 16,6 | 18,9 | 17,0 | 392 |
| Int-4-3A Silage | 15,9 | 4,2 | 34,1 | 10,6 | 35,3 | 47,4 | 19,4 | 2,8 | 0,6 | 16,7 | 30,6 | 27,3 | 317 |
| Int-F-3-1A Silage | 16,0 | 3,9 | 29,2 | 9,3 | 41,5 | 47,5 | 19,5 | 3,1 | 0,3 | 15,3 | 22,7 | 20,6 | 315 |
| Int-F-3-2A Silage | 13,6 | 3,9 | 36,5 | 9,9 | 36,1 | 48,5 | 19,5 | 3,2 | 0,5 | 15,4 | 28,2 | 25,4 | 272 |
| Int-F-3-3A Silage | 17,4 | 4,0 | 35,9 | 10,2 | 32,5 | 47,9 | 19,3 | 2,8 | 0,3 | 17,4 | 16,6 | 14,9 | 190 |
| Int-S-3-1A Silage | 16,3 | 4,0 | 32,9 | 10,4 | 36,4 | 45,0 | 19,1 | 2,4 | 0,5 | 18,7 | 19,7 | 17,6 | 362 |
| Int-S-3-2A Silage | 15,1 | 4,2 | 31,0 | 9,8 | 39,9 | 46,1 | 19,5 | 3,0 | 0,3 | 15,2 | 24,0 | 21,6 | 192 |
| Int-S-3-3A Silage | 15,2 | 4,0 | 38,4 | 10,6 | 31,8 | 44,1 | 18,6 | 2,7 | 0,4 | 16,5 | 19,8 | 17,7 | 243 |

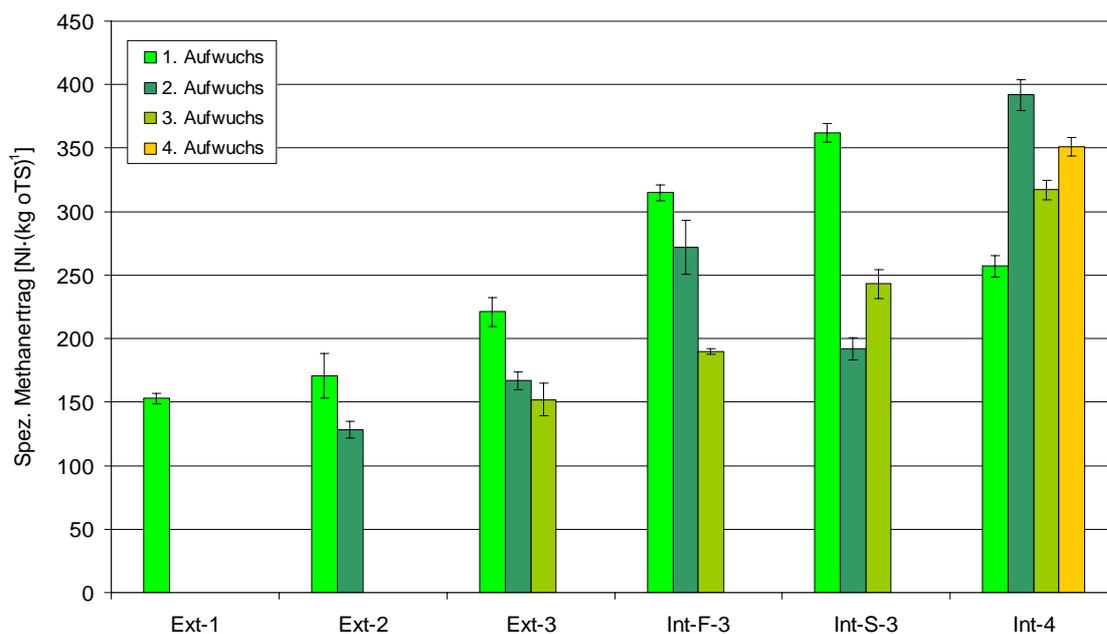


Abbildung 21: Spezifischer Methanertrag der Wiesengrasbestände im Verlauf der einzelnen Aufwüchse

5.1.3.3 Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt des Wiesengrases

Aus den Daten der Biomasseproduktion und der spezifischen Methanbildung wurde der Methanhektarertrag berechnet (Abbildung 22).

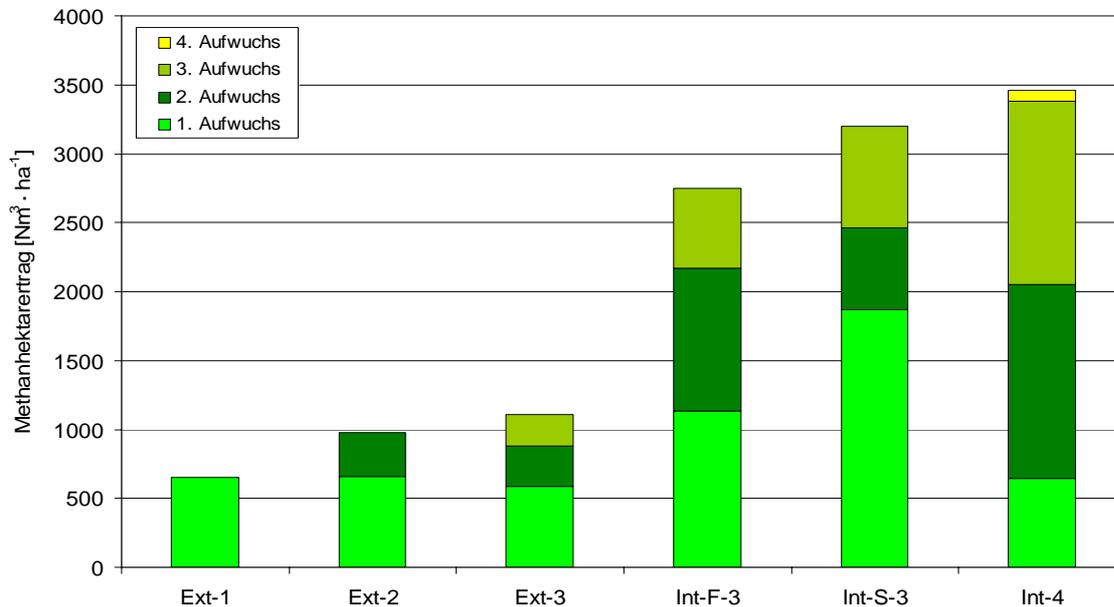


Abbildung 22: Methanhektarerträge der Wiesenrasbestände in den einzelnen Aufwüchsen

Der Methanhektarertrag der extensiven Varianten lag um gut 2/3 unter denen der intensiver genutzten Varianten. Im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Biomasseertrag erhöhte sich der gesamte Methanhektarertrag je mehr Aufwüchse geerntet wurden. Der absolute Methanhektarertrag des vierten Aufwuchses in der Variante In-4 war aber sehr gering, so dass es fraglich ist, ob der Aufwand für eine zusätzliche Ernte durch den geringfügig höheren Methanhektarertrag ausgeglichen werden kann. Weiterhin fällt auf, dass bei gleicher Bewirtschaftungsintensität (3 Schnitte), eine spätere Ernte vom Aufwuchs (Int-S-3) Vorteile im Methanhektarertrag im Vergleich zu einer früheren Ernte (Int-F-3) aufweist.

Aus den vorliegenden Ergebnissen zum Wiesenras lassen sich in Hinblick auf einen optimalen Erntezeitpunkt folgende Punkte ableiten:

- ein verzögerter erster Schnitt (ca. zwei Wochen) kann den gesamten Methanhektarertrag bei mehrschnittigen Systemen erhöhen (vor allem bedingt durch den höheren Biomasseertrag und die höhere spezifische Methanbildung im verzögerten ersten Aufwuchs)
- die Aufwüchse sollten im 2–3 Vegetationsstadium geschnitten werden (d.h. Zeitraum Ährenschieben bis Blüte)

Zur Silagenbereitung sollte das Erntegut angewelkt werden. Im angewelkten Wiesenras sollte der durchschnittliche Trockenmassegehalt bei über 28 % liegen. Überständiges und sperriges Wiesenras sollte nicht zur Silagenbereitung verwendet werden sondern in die Heubereitung gehen.

Hinsichtlich der Beziehung zwischen dem Rohnährstoffgehalt des Ausgangsmaterials und dem spezifischen Methanbildungsvermögen scheinen allerdings noch weiterführende, detaillierte Untersuchungen erforderlich. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass für die Festle-

gung von Futterwertdaten aus Grünland generell mehrere Versuchsjahre und eine stärkere Anzahl an entsprechenden Wiederholungen erforderlich sind – eine derartige Vorgangsweise würde auch im Falle der Ermittlung des Methanbildungspotenzials die Vorhersagegenauigkeit deutlich erhöhen.

In weiterer Folge muss auch der Faktor „Botanische Bestandeszusammensetzung“ genau analysiert werden. Dieser spielt insbesondere im Bereich Dauergrünland eine sehr starke Rolle und beeinflusst ganz maßgeblich den Gehalt an vergärbaren Roh Nährstoffen. In diesem Zusammenhang erscheint auch die Untersuchung von artenreinen resp. sogar sortenreinen Grünlandbeständen von großem Interesse – dazu würden sich entsprechende Untersuchungen mit Biomasse aus Wertprüfungsversuchen für Gräser- und Kleearten an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein anbieten.

5.1.4 Mais

Die Energiepflanze Mais wurde zusätzlich in das pflanzenbauliche Versuchsprogramm des vorliegenden Projekts aufgenommen. Es wurden insgesamt sechs Maissorten am Standort Haidershofen angebaut (Tabelle 38). Der Bodentyp dieses Standortes ist Braunerde, die Jahresniederschlagsmenge lag bei 553 mm. Die Vorfrucht war Wintergerste. Der Aussaattermin der verschiedenen Maissorten war am 17.4.2004. Es wurden jeweils 89.000 Körner pro Hektar ausgesät. Einmal während der Vegetationsperiode wurde ein Herbizideinsatz durchgeführt, dreimal während der Vegetationsperiode gedüngt.

Tabelle 38. Übersicht über wichtige Daten zum Maisstandort und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen

| Maissorte | Standort | Niederschlag im Jahresdurchschnitt | Bodentyp | Vorfrucht | Aussaat-termin | Kör-nerha ⁻¹ | Herbizid | Düngung |
|-----------|--------------|------------------------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| | | | | | | | pro ha | pro ha |
| Baxter | Haidershofen | 553 mm | Brauner- de | Winter- gerste | 17.04.04 | 89000 | Zeus+Dual Go 0,5 l (15.05.04) | *SG 20 m ³ *HSt 80 kg *LH 400 kg (10.04.– 16.05.04) |
| Wexxil | | | | | | | | |
| DK532 | | | | | | | | |
| Cecilia | | | | | | | | |
| Alisun | | | | | | | | |
| Doge | | | | | | | | |

*SG = Schweinegülle, HSt = Harnstoff, LH = Linzer Hit

Daten zu den Erntezeitpunkten, der Vegetationsentwicklung sowie Alter der Maissorten zum Erntezeitpunkt sind Tabelle 39 zu entnehmen. Insgesamt wurden die Sorten zu vier Terminen geerntet, im BBCH-Vegetationsstadium 73 (Anfang Milchreife), 75 (Ende Milchreife), 84 (Mitte Teigreife) und 85 Ende Teigreife). Das BBCH-Vegetationsstadium 89 (Vollreife) wurde nicht erreicht. Mit Ausnahme der Sorte Baxter, die eine mittelspäte Sorte ist, waren alle anderen Sorten spätreif. Zur vierten und letzten Ernte waren die Maisbestände 175 Tage alt.

Tabelle 39. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Maissorten zum Erntezeitpunkt

| | Maissorte | | | | | |
|--------------------|------------------------|--------|-------|---------|--------|------|
| | Baxter | Wexxil | DK532 | Cecilia | Alisun | Doge |
| FAO | 380 | 500 | 500 | 550 | 560 | 600 |
| 1. Ernte | 26.08.2004 | | | | | |
| Vegetationsstadium | 73 (Anfang Milchreife) | | | | | |
| Wachstumstag | 107 | | | | | |
| 2. Ernte | 15.09.2004 | | | | | |
| Vegetationsstadium | 75 (Ende Milchreife) | | | | | |
| Wachstumstag | 135 | | | | | |
| 3. Ernte | 05.10.2004 | | | | | |
| Vegetationsstadium | 84 (Mitte Teigreife) | | | | | |
| Wachstumstag | 148 | | | | | |
| 4. Ernte | 20.10.2004 | | | | | |
| Vegetationsstadium | 85 (Ende Teigreife) | | | | | |
| Wachstumstag | 175 | | | | | |

¹Die Entwicklungsstadien des Mais wurden nach der BBCH-Skala definiert.

Abbildung 23 zeigt beispielhaft einen Maisbestand im Vegetationsverlauf zu verschiedenen Erntezeitpunkten.



1 Ernte –76 Wuchstage
34-4Stengelknoten

2 Ernte –89 Wuchstage
51-Rispenschieben

4 Ernte –111 Wuchstage
73-Frühmilchreife

5 Ernte –132 Wuchstage
85 Teigreife

Abbildung 23. Maisbestand im Vegetationsverlauf zu verschiedenen Erntezeitpunkten

5.1.4.1 Biomasseertrag des Mais

Den Verlauf der Ertragsentwicklung der verschiedenen Maissorten gibt Tabelle 40 wieder. Dargestellt sind der Frischmasseertrag [$t\ ha^{-1}$], der Trockenmassegehalt in der Frischmasse [% FM] und der Trockenmasseertrag [$t\ ha^{-1}$] der verschiedenen Maissorten zu den vier Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände. Die höchsten Frischmasseerträge wurden zur 1. (DK532 und Cecilia) bzw. 2. Ernte (Baxter, Wexxil, Alisun und Doge) erreicht. Mit Ausnahme der Sorten Cecilia und Doge stieg der Trockenmassegehalt der Biomasse im Verlauf der Vegetation stetig an. Die Sorte Cecilia erreicht schon zur 2. Ernte den höchsten Trockenmassegehalt und Doge zur 3. Ernte. In Bezug auf den Trockenmasseertrag erreichten drei Sorten (DK532, Cecilia und Doge) ihre höchsten Erträge schon in der 2. Ernte zum Ende der Milchreife. Die Sorten Baxter und Alisun hatten ihre höchsten Trockenmasseerträge in der 3. Ernte im Vegetationsstadium „Mitte Teigreife“. Zur 4. Ernte (Ende Teigreife) wurde mit der Sorte Wexxil der im Vergleich zu allen Sorten höchste Ertrag an Trockenmasse erzielt. Dieser lag bei $30,8\ t\ ha^{-1}$.

Je spätreifer die Sorten waren, umso weniger Biomasse bildeten sie und umso weiter waren die Sorten zum Zeitpunkt der Ernten von der Silierreife (TM-Gehalt zwischen 30 und 35 %) entfernt. Aus den vorliegenden Versuchen zeigt sich die ertragliche Überlegenheit der mittelspäten Maissorte Baxter und der späten Sorte Wexxil im Vergleich zu allen anderen sehr spät reifenden Maissorten.

Tabelle 40. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt und Trockenmasseertrag der Maissorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. dem Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände

| | Maissorten | | | | | |
|---------------------|------------------------|--------|-------|---------|--------|-------|
| | Baxter | Wexxil | DK532 | Cecilia | Alisun | Doge |
| FAO | 380 | 500 | 500 | 550 | 560 | 600 |
| 1. Ernte | 73 (Anfang Milchreife) | | | | | |
| FM [$t\ ha^{-1}$] | 108,6 | 103,3 | 98,0 | 100,5 | 101,4 | 108,4 |
| TM [% FM] | 16,3 | 17,5 | 16,2 | 17,3 | 17,0 | 14,8 |
| TM [$t\ ha^{-1}$] | 17,7 | 18,1 | 15,9 | 17,4 | 17,2 | 16,0 |
| 2. Ernte | 75 (Ende Milchreife) | | | | | |
| FM [$t\ ha^{-1}$] | 115,3 | 108,9 | 93,5 | 99,5 | 102,3 | 109,4 |
| TM [% FM] | 25,2 | 24,6 | 26,2 | 28,3 | 21,8 | 21,9 |
| TM [$t\ ha^{-1}$] | 29,1 | 26,8 | 24,5 | 28,1 | 22,3 | 24,0 |
| 3. Ernte | 84 (Mitte Teigreife) | | | | | |
| FM [$t\ ha^{-1}$] | 99,2 | 94,5 | 78,6 | 87,1 | 88,5 | 95,3 |
| TM [% FM] | 30,3 | 29,6 | 26,2 | 27,4 | 26,0 | 23,1 |
| TM [$t\ ha^{-1}$] | 30,1 | 28,0 | 20,6 | 23,9 | 23,0 | 22,0 |
| 4. Ernte | 85 (Ende Teigreife) | | | | | |
| FM [$t\ ha^{-1}$] | 78,0 | 96,4 | 79,2 | 95,6 | 78,0 | 96,0 |
| TM [% FM] | 33,1 | 31,9 | 29,3 | 28,2 | 27,8 | 22,2 |
| TM [$t\ ha^{-1}$] | 25,8 | 30,8 | 23,2 | 27,0 | 21,7 | 21,3 |

Abbildung 24 zeigt die Entwicklung des Biomasseertrages (t TM ha⁻¹) aller Maissorten im Vegetationsverlauf in einer graphischen Darstellung.

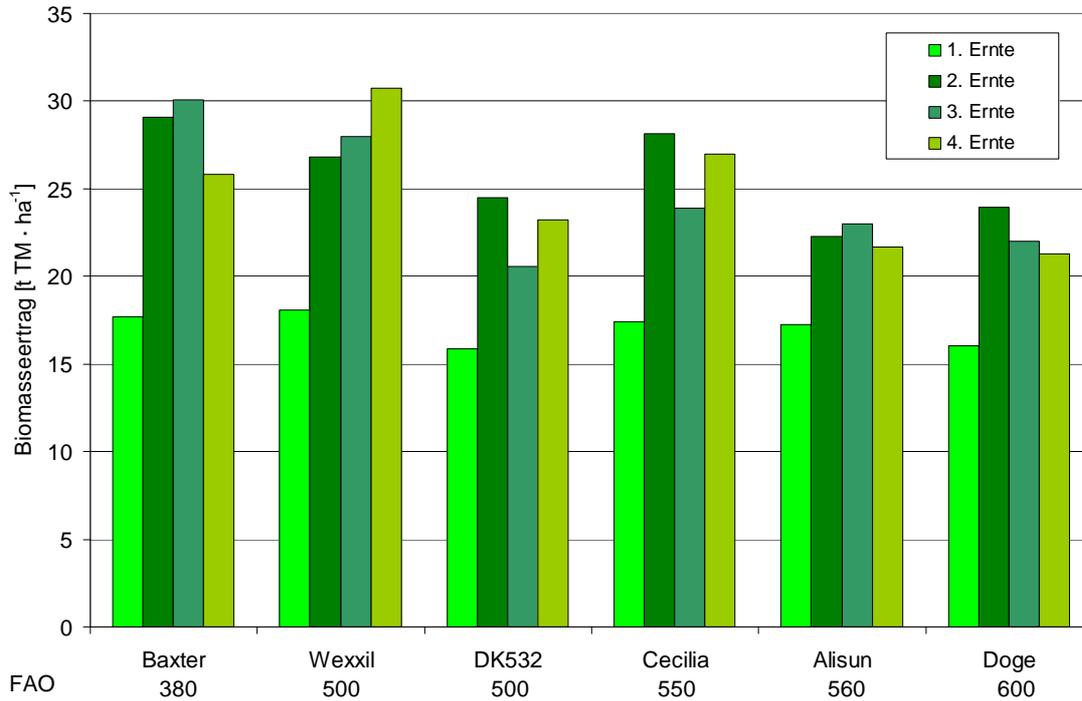


Abbildung 24: Entwicklung des Biomasseertrages der verschiedenen Maissorten

5.1.4.2 Qualität (Inhaltsstoffe und spezifisches Methanbildungsvermögen)

Wie schon für alle anderen Energiepflanzen wurden auch bei den verschiedenen Maissorten Analysen zu den Inhaltsstoffen der Silagen durchgeführt und die CH₄-Ausbeute bestimmt. Im Falle des Mais wurden die Sorten zum 3. Erntezeitpunkt untersucht. Tabelle 41 gibt die Daten zu folgenden Parametern wieder: Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), Rohasche (XA), N-freie Extraktstoffen (XX), Lignin (ADL), Bruttoenergie (BE), Cellulose (Cel), Hemicellulose (H-Cel), Gesamtkohlenstoff (C_t), Gesamtstickstoff (N_t), Ammoniumstickstoff (NH₄-N), C/N-Verhältnis, Trockenmasse (TM), organische Masse (oTS) und spezifische Methanausbeute (CH₄-Ausbeute).

Tabelle 41. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH₄-Ausbeute der Maissorten zum 3. Erntetermin

| Maissilage | Ernte | XP | XL | XF | XA | XX | ADL | BE | Cel | H-Cel | C _t | N _t | NH ₄ -N | C/N | TM | oTS | CH ₄ -Ausbeute |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|--------------------------|------|-------|----------------|----------------|--------------------|------|------|------|---------------------------|
| | | % TM | MJ (kg TM) ⁻¹ | % TM | % TM | % TM | % TM | % TM | | % FM | % FM | NI (kg oTS) ⁻¹ |
| Baxter | 3. | 7,6 | 2,4 | 24,0 | 3,6 | 62,5 | 2,9 | 18,8 | 24,1 | 31,8 | 46,9 | 1,5 | 0,2 | 30,6 | 32,2 | 31,0 | 412 |
| Wexxil | 3. | 7,8 | 2,0 | 21,4 | 4,0 | 64,7 | 2,7 | 17,2 | 23,0 | 33,7 | 47,3 | 1,6 | 0,2 | 30,3 | 28,7 | 27,5 | 359 |
| DK532 | 3. | 7,4 | 2,3 | 23,2 | 4,4 | 62,7 | 3,3 | 18,6 | 24,7 | 25,4 | 48,0 | 1,7 | 0,2 | 28,7 | 24,5 | 23,4 | 412 |
| Cecilia | 3. | 7,8 | 2,3 | 23,4 | 3,9 | 62,6 | 3,0 | 18,8 | 24,0 | 32,3 | 47,1 | 1,6 | 0,2 | 28,7 | 25,5 | 24,5 | 393 |
| Alisun | 3. | 7,5 | 1,8 | 27,6 | 5,1 | 58,0 | 4,3 | 18,7 | 30,5 | 26,7 | 46,5 | 1,5 | 0,2 | 30,2 | 22,2 | 21,1 | 390 |
| Doge | 3. | 7,3 | 1,5 | 30,2 | 5,6 | 55,4 | 3,9 | 18,9 | 30,9 | 32,3 | 47,7 | 1,5 | 0,2 | 31,6 | 23,3 | 22,0 | 422 |

Der Rohproteingehalt in den Silagen der verschiedenen Maissorten lag zwischen 7,3 und 7,8 %, der Rohfettgehalt variierte zwischen 1,5 und 2,4 %. In beiden Fällen wurde für die Sorte Doge der niedrigste Wert ermittelt. Der analysierte Rohfasergehalt der Silagen lag zwischen 21,4 % (Sorte Wexxil) und 30,2 % (Sorte Doge). Die Sorte Doge hatte auch mit 23 % den niedrigsten Cellulosegehalt. Für Hemicellulose wurden Werte zwischen 25,4 % (DK532) und 33,7 % (Wexxil) ermittelt. Den niedrigsten Ligningehalt wies die Sorte Wexxil auf. Der Rohaschegehalt der Silagen lag zwischen 3,6 und 5,6 %. Im Gehalt an N-freien Extraktstoffen wurde eine Spanne von 55,4 % (Doge) bis 64,7 % (Wexxil) ermittelt. Der höchste Bruttoenergiegehalt wurde für die Sorte Doge bestimmt, der niedrigste für die Sorte Wexxil. Für den Gehalt an Kohlenstoff wurden Werte zwischen 46,5 und 48,0 % bestimmt. Der Stickstoffgehalt der Silagen lag im Durchschnitt bei 1,6 %, der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ bei 0,2 %. Das C/N-Verhältnis der Silagen reichte von 31,6 (Doge) bis 28,7 (DK532 und Cecilia). Im Vergleich zu allen anderen Sorten besaß die mittelspäte Sorte Baxter mit Abstand den höchsten Gehalt an Trockenmasse und organische Substanz.

In Bezug auf die spezifische Methanausbeute wurden Werte zwischen 359 und 422 $\text{NI} \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$ ermittelt. Der niedrigste Wert ergab sich für die Sorte Wexxil, diese Sorte hatte auch den niedrigsten Bruttoenergiegehalt. Die Sorten Alisun und Cecilia lagen bei 390 und 393 $\text{NI} \cdot \text{CH}_4 \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$. Für drei Sorten (Baxter, DK532 und Doge) wurden Werte über 400 $\text{NI} \cdot \text{CH}_4 \cdot (\text{kg oTS})^{-1}$ ermittelt (Abbildung 25). Die absolut höchste spezifische Methanausbeute wurde mit der Sorte Doge erzielt, diese Sorte hatte auch den höchsten Bruttoenergiegehalt.

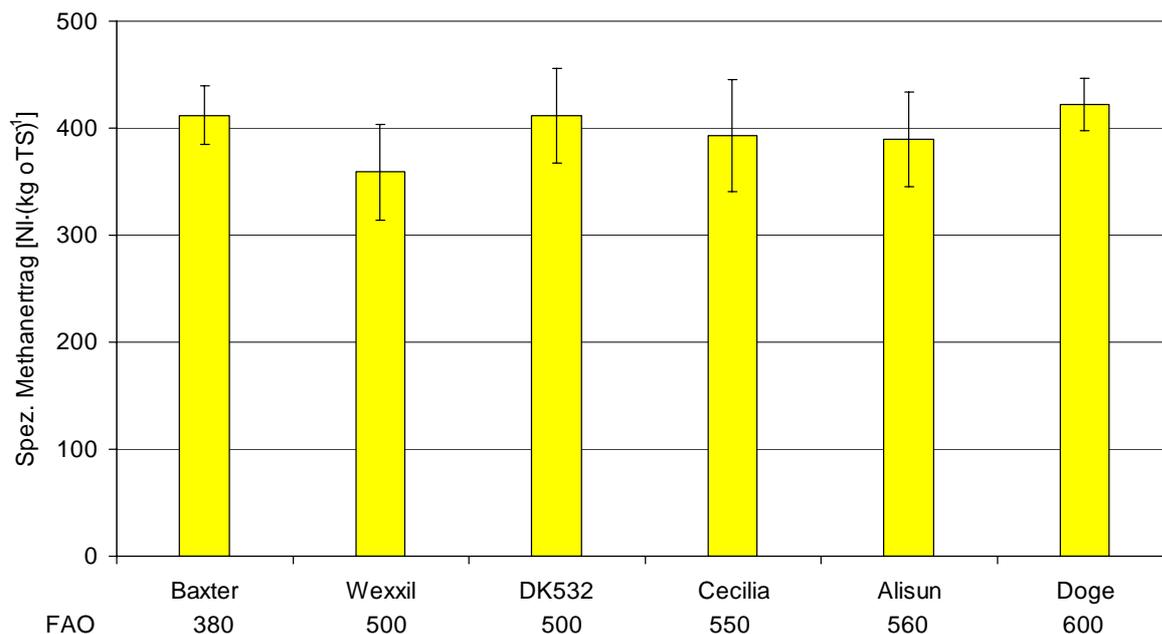


Abbildung 25: Spezifischer Methanertrag der verschiedenen Maissorten

5.1.4.3 Methanhektarertrag und optimaler Erntezeitpunkt

Gute Energiemaissorten sollten ihren maximalen Methanhektarertrag erreicht haben, wenn sie optimal silierfähig sind, d.h. einen Trockenmassegehalt von rund 30 % besitzen. Zum 3. Erntetermin erreichte nur die mittelspäte Sorte Baxter einen Trockenmassegehalt von 30,3 %. Alle anderen, spätreifen Sorten besaßen einen Trockenmassegehalt, der unter 30 % lag, wobei die Spanne von 23,1 % (Doge) bis 29,6 % (Wexxil) reichte.

Abbildung 26 zeigt den Methanhektarertrag aller Maissorten zum 3. Erntetermin. Mit ca. 12.400 Nm³ CH₄ ha⁻¹ wurde für die mittelspäte Sorte Baxter mit Abstand der höchste Methanhektarertrag bestimmt. Die meisten der spätreifen Maissorten lagen in ihrem Methanhektarertrag unter 10.000 Nm³ CH₄ ha⁻¹, nur mit den Sorten Wexxil und Cecilia wurde ein Methanhektarertrag erreicht, der über diesem Wert lag. Mit Ausnahme der Sorte Wexxil entspricht die Variabilität des Methanhektarertrages in etwa auch der Variabilität der gemessenen Biomasseerträge zum gleichen Erntezeitpunkt (Abbildung 24).

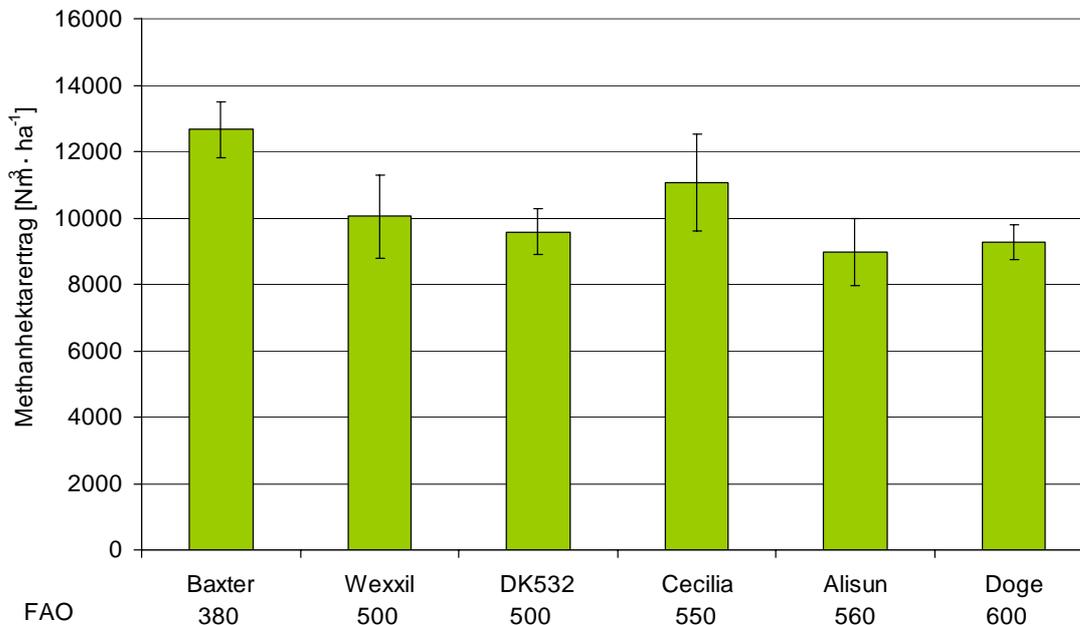


Abbildung 26: Methanhektarertrag der untersuchten Maissorten zum 3. Erntetermin

Wie für alle vorhergehenden Energiepflanzen, die im vorliegenden Projekt untersucht wurden, stellt sich auch für den Energiemais die Frage nach dem optimalen Erntetermin. Der optimale Erntezeitpunkt ist erreicht, wenn die Maissorte ihr maximales Bildungsvermögen für Methan und Biomasse besitzt und gut silierfähig ist (ca. 30–33 % Trockenmasse). Aus dem vorliegenden Sortenvergleich lassen sich in Bezug auf den optimalen Erntezeitpunkt der verschiedenen Maishybriden folgende Aussagen ableiten:

- Baxter: Ernte im Vegetationsstadium „Mitte Teigreife“ (3. Ernte)
- Wexxil: Ernte eventuell im Vegetationsstadium „Ende Teigreife“ (4. Ernte) → müsste in weiterführenden Untersuchungen überprüft werden; Wexxil hatte die höchsten Biomasseerträge zur 4. Ernte, was auch hohe Methanhektarerträge erwarten lässt
- DK532, Cecilia, Alisun und Doge: optimaler Erntezeitpunkt wird unter österreichischen Bedingungen nicht erreicht

Nachhaltige Fruchtfolgesysteme für den Energiepflanzenanbau (Arbeitsschwerpunkt 1.3.)

Im Folgenden werden regionstypische Modellfruchtfolgen angegeben. Die weiterentwickelten Fruchtfolgen für den Energiepflanzenbau (1) unter besonderer Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen und (2) mit maximalen Methanhektarerträgen können aus dem Anhang „Nachhaltige Fruchtfolgesysteme für den Energiepflanzenbau“ entnommen werden.

5.1.5 Trockengebiet – Region Weinviertel

5.1.5.1 Biologische Betriebe

Aus den Vorgaben (siehe Methodenteil) leitete sich für biologische Marktfruchtbetriebe in der Region Weinviertel eine regionstypische Modellfruchtfolge mit Hack- und Ölfruchtanbau (Tabelle 42) sowie eine regionstypische Modellfruchtfolge ohne Hack- und Ölfruchtanbau ab (Tabelle 43).

Tabelle 42: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit Hack- und Ölfrüchten

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|-----------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Luzerne u. a. Brachen | 14,3 | – | ***80,0 |
| 2a | Luzerne u. a. Brachen | 14,3 | – | ***90,0 |
| 3a | Winterweizen ZF | 14,3 | 42,0 | 46,2 |
| 4a | Körnermais | 8,2 | ****57,8 | ****57,8 |
| 4a | Kartoffel ZF | 6,1 | 221,0 | – |
| 5a | Winterweizen | 8,3 | 42,0 | 46,2 |
| 5b | Ölkürbis ZF | 6,0 | 4,7 | – |
| 6a | Körnererbse ZF | 14,3 | 26,3 | 26,3 |
| 7a | Sommergerste | 7,3 | 36,8 | 36,8 |
| 7b | Triticale | 7,0 | 47,0 | 61,1 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll, ist = tatsächliche Artenverteilung, soll = sich rechnerisch ergebende Kulturartenverteilung.

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Erträge aus FREYER ET AL. (2005), Trockenmasseerträge

**** Trockenmasseerträge

Der Anteil an Getreide und Mais lag in der Modellfruchtfolge mit Hack- und Ölfruchtanbau bei 45,1 % (reiner Winterweizenanteil: 22,6 %). Der Anteil an Futterleguminosen betrug 28,6 %. Die Hackfrüchte kamen auf 6,1 %, die Ölfrüchte auf 6,0 % und die Körnerleguminosen auf 14,3 %.

Tabelle 43: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel ohne Hack- und Ölfrüchte

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|-----------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Luzerne u. a. Brachen | 14,3 | – | ***80,0 |
| 2a | Luzerne u. a. Brachen | 14,3 | – | ***90,0 |
| 3a | Winterweizen ZF | 14,3 | 42,0 | 46,2 |
| 4a | Winterroggen (SW) | 9,2 | 35,5 | 49,7 |
| 4b | Dinkel | 3,9 | 37,0 | 48,1 |
| 4c | Sommergerste ZF | 1,2 | 36,8 | 36,8 |
| 5a | Körnererbse ZF | 14,3 | 26,3 | 26,3 |
| 6a | Winterweizen | 7,3 | 42,0 | 46,2 |
| 6b | Körnermais ZF | 7,0 | ****57,8 | ****57,8 |
| 7a | Sommergerste | 14,3 | 36,8 | 36,8 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll, SW = Speiseware

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach dem üblichen Korn/Strohverhältnis

*** Erträge aus FREYER ET AL. (2005: S. 26), Trockenmasseertrag

**** Trockenmasseerträge

In der Fruchtfolge ohne Hack- und Ölfrüchte war der Getreide- und Maisanteil auf 57,2 % angestiegen (reiner Winterweizenanteil: 21,6 %). Der Anteil an Futterleguminosen in der Fruchtfolge betrug 28,6 % und die Körnerleguminosen kamen auf 14,3 %. Hackfrüchte und Ölfrüchte waren in der Fruchtfolge nicht enthalten.

5.1.5.2 Konventionelle Betriebe

Die regionstypische Modellfruchtfolge für den konventionellen Landbau im Weinviertel wurde in Anlehnung an die Daten von EDER UND DARNHOFER (2003) und der mittleren Kulturartenverteilung entwickelt. Die folgende Modellfruchtfolge bezieht sich auf Betriebe mit einem hohen Hackfruchtanteil (Tabelle 44).

Die regionstypische Modellfruchtfolge mit hohem Hackfruchtanteil bestand aus 59,0 % Getreide, 22,0 % Hackfrüchten, 10,0 % Futterleguminosen, 3,0 % Körnerleguminosen und 6,0 % Ölfrüchte. Feldgemüse wurde nicht berücksichtigt. Der Zuckerrübenanteil wurde zugunsten des Kartoffelanteils gesenkt und auf 7 % beschränkt.

Tabelle 44: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit hohem Hackfruchtanteil

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|-----------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Kartoffel | 15,0 | 287,5 | – |
| 1b | Luzerne u. a. Brachen | 10,0 | – | ***115,0 |
| 2a | Winterweizen ZF | 25,0 | 62,5 | 68,8 |
| 3a | Durumweizen | 9,0 | 45,0 | 49,5 |
| 3b | Zuckerrübe | 7,0 | 625,0 | 500,0 |
| 3c | Sonnenblume | 6,0 | 37,5 | 131,3 |
| 3d | Körnererbse ZF | 3,0 | 42,5 | 42,5 |
| 4a | Sommergerste | 25,0 | 50,0 | 50,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis bzw. Blatt/Rübenverhältnis

*** Trockenmasseertrag

Ein weiteres Beispiel einer konventionellen, regionstypischen Modellfruchtfolge im Weinviertel ist ein Betrieb mit einem hohen Anteil an Ölsaaten (Tabelle 45).

Tabelle 45: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit hohem Ölsaatenanteil

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|-----------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Winterraps | 15,0 | 33,0 | 66,8 |
| 1b | Luzerne u. a. Brachen | 10,0 | – | ***115,0 |
| 2a | Winterweizen ZF | 25,0 | 62,5 | 68,8 |
| 3a | Körnermais | 11,0 | ***82,5 | ***82,5 |
| 3b | Körnererbse | 7,0 | 42,5 | 42,5 |
| 3c | Ölkürbis ZF | 7,0 | 7,5 | – |
| 4a | Sommergerste | 15,0 | 50,0 | 50,0 |
| 4b | Triticale | 10,0 | 52,5 | 68,3 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll.

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

Die regionstypische Modellfruchtfolge mit hohem Ölsaatenanteil bestand aus 61,0 % Getreide und Mais, 10,0 % Futterleguminosen, 7,0 % Körnerleguminosen und 22,0 % Ölfrüchten.

5.1.6 Übergangsregion Mostviertel-Eisenwurzen NORD

5.1.6.1 Biologische Betriebe

Die regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Ackerbaubetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD (Tabelle 46) wurde in Anlehnung an das Betriebsmodell „Ackerbau Intensiv“ (KRATOCHVIL 2003) entwickelt. Es handelte sich dabei um einen reinen Ackerbaubetrieb mit 13 ha Nutzfläche. Die Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Sommergerste und Klee gras nahmen über 65 % der Fruchtfolge ein. Weitere Kulturen waren Körnererbsen, Kartoffeln, Winterroggen und Dinkel mit einem Gesamtanteil von 24,5 %.

Tabelle 46: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|---------------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Klee gras und Stilllegung | 16,7 | – | ***110,0 |
| 2a | Winterweizen ZF | 16,7 | 42,0 | 46,2 |
| 3a | Wintergerste | 10,7 | 42,0 | 42,0 |
| 3b | Kartoffel | 6,0 | 200,0 | – |
| 4a | Körnererbse | 10,7 | 26,3 | 26,3 |
| 4b | Wintergerste | 6,0 | 42,0 | 42,0 |
| 5a | Winterroggen | 10,7 | 36,0 | 50,4 |
| 5b | Dinkel ZF | 6,0 | 33,0 | 42,9 |
| 6a | Sommergerste | 16,7 | 33,0 | 33,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Erträge aus FREYER ET AL. (2005), Trockenmasseertrag

Die regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Schweinebetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD (Tabelle 47) wurde in Anlehnung an das Betriebsmodell „Zuchtsauen Extensiv“ von KRATOCHVIL (2003) entwickelt. Es handelte sich um einen Betrieb mit Zuchtsauenhaltung. Der Betrieb verfügte über 12 ha Ackerfläche. Die Kulturen Winterweizen, Körnermais und Sojabohne nahmen einen Anteil von 47 % ein. Die restlichen Kulturen waren Winter- und Sommergerste, Hafer, Körnererbsen, Dinkel und Stilllegungsflächen bzw. Klee gras. Als Zwischenfrüchte wurden vor allem vor und nach der Sojabohne immer andere Leguminosen als im Hauptfruchtanbau gewählt und mit Nichtleguminosen ergänzt.

Tabelle 47: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Schweinehaltung (Zuchtsauen) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|--------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Stilllegungsfläche | 10,0 | – | – |
| 1b | Kleegras | 4,3 | – | ***110,0 |
| 2a | Winterweizen ZF | 14,3 | 42,0 | 46,2 |
| 3a | Körnermais ZF | 14,3 | ****58,0 | ****58,0 |
| 4a | Körnererbse | 10,3 | 26,0 | 26,3 |
| 4b | Sojabohne | 4,0 | 26,0 | 38,3 |
| 5a | Wintergerste | 11,0 | 42,0 | 42,0 |
| 5b | Dinkel ZF | 3,3 | 33,0 | 56,5 |
| 6a | Sojabohne ZF | 14,3 | 26,0 | 38,3 |
| 7a | Sommergerste | 10,0 | 33,0 | 33,0 |
| 7b | Hafer | 4,3 | 33,0 | 33,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Erträge aus FREYER ET AL. (2005), Trockenmasseertrag

**** Trockenmasseerträge

Die regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD (Tabelle 48) wurde in Anlehnung an das Betriebsmodell „Milchkuh Intensiv“ von KRATOCHVIL (2003) entwickelt. Der Milchkuhbetrieb verfügte über 8 ha Ackerfläche. KRATOCHVIL (2003) gab nur drei verschiedene Kulturarten für diesen Betrieb an: Triticale (32,5 % der Ackerfläche), Sommergerste (22,5 % der Ackerfläche) und Ackerfutter (45 % der Ackerfläche). Um diese Kulturartenverteilung annähernd einzuhalten, musste die Fruchtfolge auf vier Jahre gesenkt werden. Es musste berücksichtigt werden, dass in den ersten zwei Fruchtfolgejahren nur einmal Kleegras angebaut wurde, um den Futterleguminosenanteil in der Fruchtfolge bei 25 % zu halten und somit die notwendigen Anbaupausen einhalten zu können.

Tabelle 48: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|---------------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Kleegras od. Wechselwiese | 25,0 | – | ***110,0 |
| 2a | Kleegras od. Wechselwiese | 18,0 | – | ***120,0 |
| 2b | Triticale | 7,0 | 43,0 | 55,9 |
| 3a | Triticale | 25,0 | 43,0 | 55,9 |
| | ZF | | | |
| 4a | Sommergerste | 25,0 | 33,0 | 33,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Erträge aus FREYER ET AL. (2005); Trockenmasseerträge

5.1.6.2 Konventionelle Betriebe

Die regionstypische Modellfruchtfolge für konventionelle Betriebe (Tabelle 49) wurde nach dem Betriebsmodell „Ackerbau Intensiv“ (KRATOCHVIL 2003) gestaltet. Es handelte sich um einen reinen Ackerbaubetrieb mit 13 ha Ackerfläche. Die Kulturart Winterweizen nahm einen Anteil von knapp 47 % ein.

Tabelle 49: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|--------------|---|---|---------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Winterweizen | 13,3 | 60,0 | 66,0 |
| 1b | Stilllegung | 11,0 | – | – |
| 1c | Raps | 9,0 | 33,0 | 69,3 |
| 2a | Winterweizen | 33,3 | 60,0 | 66,0 |
| | ZF | | | |
| 3a | Körnermais | 17,0 | ***71,3 | ***71,3 |
| 3b | Sommergerste | 14,0 | 46,0 | 46,0 |
| 3c | Zuckerrübe | 2,3 | 625,0 | 500,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

Die nachfolgende regionstypische Modellfruchtfolge (Tabelle 50) wurde nach dem Betriebsmodell „Mastschweine Extensiv“ (KRATOCHVIL 2003) gestaltet. Es handelte sich um einen Mastschweinebetrieb mit 15 ha Ackerfläche. Die Hauptkulturarten waren Körnermais (als Maiskornsilage) und Triticale mit einem Anteil von knapp 60 %.

Tabelle 50: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Schweinehaltung (Mastschweine) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|--------------------|---|---|---------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Raps | 14,7 | 33,0 | 69,3 |
| 1b | Stilllegungsfläche | 10,0 | – | – |
| 1c | Sommergerste | 8,7 | 46,0 | 46,0 |
| | ZF | | | |
| 2a | Triticale | 26,6 | 56,0 | 72,8 |
| 2b | Winterweizen | 6,7 | 60,0 | 66,0 |
| | ZF | | | |
| 3a | Körnermais | 33,3 | ***71,3 | ***71,3 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

Die dritte regionstypische Modellfruchtfolge für konventionelle Betriebe (Tabelle 51) wurde nach dem Betriebsmodell „Milchkuh Intensiv“ (KRATOCHVIL 2003) gestaltet. Es handelte sich um einen Milchkuhbetrieb mit 8 ha Ackerfläche. Triticale nahm einen Anteil von 50 % ein. Die restlichen 50 % bestanden aus Ackerfutter, Silomais und Sommergerste, wobei das Ackerfutter mit 25 % den höchsten Anteil einnahm.

Tabelle 51: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|--------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Kleegras | 25,0 | – | ***110,0 |
| 2a | Triticale | 25,0 | 56,0 | 72,8 |
| | ZF | | | |
| 3a | Sommergerste | 13,7 | 46,0 | 46,0 |
| 3b | Silomais | 11,3 | – | ***165,0 |
| 4a | Triticale | 25,0 | 56,0 | 72,8 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

5.1.7 Nördliche Randalpen Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

5.1.7.1 Biologische Betriebe

Die regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD (Tabelle 52) wurde in Anlehnung an das Betriebsmodell „Milch-Mutterkuh Extensiv“ von KRATOCHVIL (2003) entwickelt. Der Betrieb verfügte über 3 ha Ackerfläche, die zu 40 % aus Ackerfutter und zu 60 % aus Triticale, Sommergerste und Winterweizen bestand.

Tabelle 52: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Rinderhaltung (Milch-Mutterkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|--------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Kleegras | 20,0 | – | ***110,0 |
| 2a | Kleegras | 20,0 | – | ***120,0 |
| 3a | Winterweizen | 10,0 | 38,0 | 41,8 |
| 3b | Triticale | 10,0 | 38,0 | 49,4 |
| | ZF | | | |
| 4a | Triticale | 20,0 | 38,0 | 49,4 |
| 5a | Sommergerste | 20,0 | 33,3 | 33,3 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002a)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

Konventionelle Betriebe

Die regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD (Tabelle 53) wurde in Anlehnung an das Betriebsmodell „Milchkuh Extensiv“ von KRATOCHVIL (2003) entwickelt. Der Betrieb verfügte über 6 ha Ackerfläche, die zu 63 % aus Ackerfutter (Kleegras, Wechselwiesen) bestand. Dieser hohe Wert ist für Wechselwiesen in feuchten Lagen oder einem Wechsel der Kleearten unter Berücksichtigung der Schaderregerempfindlichkeit vertretbar (FREYER ET AL. 2005). Die restlichen Kulturen waren Triticale, Silomais und Sommergerste mit einem Anteil von 37 %.

Tabelle 53: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD

| Jahr bzw. Teilschlag | Kultur | Anteil der Kulturen innerhalb der FF in % | Mittlerer Ertrag in dt ha ⁻¹ | |
|----------------------|---------------------------|---|---|----------|
| | | | HP* | NP** |
| 1a | Kleegras od. Wechselwiese | 33,3 | – | ***110,0 |
| 2a | Kleegras od. Wechselwiese | 30,0 | – | ***120,0 |
| 2b | Sommergerste | 3,3 | 44,0 | 44,0 |
| 3a | Triticale | 22,3 | 49,0 | 63,7 |
| 3b | Silomais | 11,0 | – | ***158,0 |
| | | 100,0 | | |

Legende: ZF = Zwischenfrucht, HP = Hauptprodukt (Korn, Kürbiskern), NP = Nebenprodukt (Stroh, Blatt bzw. ganze Pflanze), - = keine Angaben möglich bzw. nicht sinnvoll

* aus BMLFUW (2002b)

** errechnet bei Marktfrüchten nach üblichem Korn/Strohverhältnis

*** Trockenmasseerträge

5.1.8 Methanhektarerträge vollständiger Fruchtfolgen

Grundsätzlich eignen sich alle ertragreichen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen als potenzielle Energiepflanzen für die Biogasproduktion. Eine arten- und sortenreiche, nachhaltige Fruchtfolge ist eine wichtige Grundlage zur Stabilisierung der Erträge, da dadurch am besten schädlings-, krankheits- und beikrautbedingte Einbußen vermieden werden.

Die in den vorhergehenden Ergebnisteilen dargestellten Fruchtfolgen beziehen sich auf die Ergebnisse von WALLA (2004b) und WALLA und SCHNEEBERGER (2005c). Diese Studien zeigten, welche Auswirkungen die Errichtung und der Betrieb einer nach dem Ökostromgesetz 2003 anerkannten Biogasanlage auf das landwirtschaftliche Betriebseinkommen haben. Es wurde gezeigt, dass das Luzernegras im Biolandbau der wichtigste Rohstoff für Biogasanlage ist. Bei ausreichender Stickstoffversorgung kann ein bestehender Rohstoffbedarf, der durch die Luzernegrasfläche nicht gedeckt werden konnte, durch den Anbau von Silomais abgedeckt werden. Für den Biolandbau ist der Futterleguminosenanbau für die Stickstoffversorgung der Folgekulturen und für die Erhaltung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit unerlässlich. Dagegen kann im konventionellen Landbau Stickstoffdünger günstig zugekauft werden. Aufgrund dessen ist verständlich, dass im konventionellen Landbau der Anbau von Luzernegras weit nach dem Silomais rangierte. Zu den Erzeugerpreisen von 2004 war der Silomais die wirtschaftlichste Kultur im konventionellen Landbau. Das heißt, je höher der Silomaisanteil, desto höher lag das Einkommen. Ganz wichtig war es aber, die Fruchtfolgestellung zu beachten. Mais zeichnet sich zwar durch eine hohe Selbstverträglichkeit aus, es muss aber trotzdem mit Zunahme von hartnäckigen Ungräsern sowie möglicherweise mit Maiszünslerbefall oder Beulenbrand und Fusarien gerechnet werden (FREYER 2003). Bei den anhaltend niedrigen Getreidepreisen ist der Anbau von Silomais aber eine gute Alternative zum Futtergetreideanbau (WALLA UND SCHNEEBERGER 2005a).

Die Vergärung von Zwischenfrüchten in der Biogasanlage war in der Modellrechnung von WALLA UND SCHNEEBERGER (2005c) nicht wirtschaftlich. Bei geringeren Kosten für die Rohstofferte

könnten allerdings auch Zwischenfrüchte wirtschaftlich sein (Arbeits erledigung mit eigenen Maschinen von Schlägen nahe der Biogasanlage). WALLA UND SCHNEEBERGER (2005c) berechneten außerdem, dass eine Vergärung von Stroh wegen der niedrigen Methanhektarerträge derzeit nicht wirtschaftlich ist.

Die Methanhektarerträge der Fruchtfolgen I (FF I) betragen im biologischen Landbau etwa 830 bis 1700 Nm³ (ha a)⁻¹ (Tabelle 54). Im konventionellen Landbau waren es etwa 1100 bis 2700 Nm³ CH₄ (ha a)⁻¹ (Tabelle 55). Die Fruchtfolgen II (FF II) erzielten im biologischen Landbau ca. 2400 bis 3600 Nm³ CH₄ (ha a)⁻¹ und im konventionellen Landbau, wegen des höheren Ertragsniveaus, ca. 3200 bis 4800 Nm³ CH₄ (ha a)⁻¹. Die höchsten Werte wurden auf Betrieben mit einem hohen Anteil an energetisch genutzten Feldfutterpflanzen erreicht.

Tabelle 54: Methanhektarerträge (Nm³ (ha a)⁻¹) biologischer Fruchtfolgen

| Standorträume | AB/GL | Ohne Tierhaltung | | Mit Tierhaltung | | | |
|--|-------|--|-------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | FF I | FF II | FF I | | FF II | |
| I. Trockengebiet: Weinviertel | AB | 1479/ 1288 | 2762 | - | | - | |
| II. Übergangsbereich: Mostviertel-Eisenwurzen NORD | AB/GL | 6 jährige FF: 1704 5 jährige FF: 1391 | 3647 | Schweine- haltung 1219 | Rinder- haltung 829 | Schweine- haltung 2839 | Rinder- haltung 2394 |
| III. Nördliche Rand- alpen: Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | GL/AB | - | - | Rinderhaltung 1135 | | Rinderhaltung 2429 | |

Legende: AB = Ackerbau; GL = Grünland; FF I = Fruchtfolgen unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen, FF II = Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen
- = Betriebstyp ist für diese Region nicht typisch bzw. nicht vorhanden

Tabelle 55: Methanhektarerträge (Nm³ (ha a)⁻¹) konventioneller Fruchtfolgen

| Standorträume | AB/GL | Ohne Tierhaltung | | Mit Tierhaltung | | | |
|--|-------|------------------|-------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | FF I | FF II | FF I | | FF II | |
| I. Trockengebiet: Weinviertel | AB | 1076 | 3216 | - | | - | |
| II. Übergangsbereich: Mostviertel-Eisenwurzen NORD | AB/GL | 2057 | 3619 | Schweine- haltung 2057 | Rinder- haltung 1544 | Schweine- haltung 3849 | Rinder- haltung 3155 |
| III. Nördliche Rand- alpen: Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | GL/AB | - | - | Rinderhaltung 2763 | | Rinderhaltung 4753 | |

Legende: AB = Ackerbau; GL = Grünland; FF I = Fruchtfolgen unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen, FF II = Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen
- = Betriebstyp ist für diese Region nicht typisch bzw. nicht vorhanden

Vergleichbare Angaben für Methanhektarerträge ganzer Fruchtfolgen konnten in der Literatur nicht gefunden werden. GRÖBLINGHOFF UND LÜTKE ENTRUP (2004) gaben Gaserträge für Grün-

roggen und als Zweitkultur Silomais an (Tabelle 56). Um diese Gaserträge mit den vorliegenden Ergebnissen vergleichen zu können, mussten sie in Methanhektarerträge umgerechnet werden.

Tabelle 56: Gas- und Methanhektarertrag Grünroggen – Zweitfrucht Mais

| 1. Frucht | 2. Frucht | Ertrag dt oTS ha ⁻¹ | | Gasertrag m ³ (ha a) ⁻¹ | Methanhektarertrag m ³ (ha a) ⁻¹ |
|------------|-----------|--------------------------------|-----------|--|---|
| | | 1. Frucht | 2. Frucht | | |
| Grünroggen | Mais | 45 | 120 | ~9500 | 5040* |

Legende: GPS = Ganzpflanzensilage

*= (4,5 t oTS ha⁻¹ Grünroggen * 588 m³ t⁻¹ oTS*53,9 % CH₄ + 12,0 t oTS ha⁻¹ Silomais*578 m³ t⁻¹ oTS*52,1 % CH₄ = 1426 + 3614 = 5040 m³ ha⁻¹ a⁻¹)

Die Möglichkeit, Mais als zweite Kulturfrucht nach Grünroggen anzubauen, wurde in der vorliegenden Studie nur bei einem biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD angewandt. Der Methanhektarertrag der beiden Kulturen im 5. Fruchtfolgejahr ergab 6631 Nm³ (ha a)⁻¹, d.h. der Methanhektarertrag lag in der vorliegenden Studie um etwa 1590 Nm³ (ha a)⁻¹ höher. Der Methanhektarertrag für Grünroggen glich den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Der Unterschied lag im Silomais begründet, denn während GRÖBLINGHOFF UND LÜTKE ENTRUP (2004) einen Methanfaktor von 30,1 m³ dt⁻¹ annahmen, wurde in der vorliegenden Studie ein Methanfaktor von 39,0 Nm³ dt⁻¹ verwendet. Dieser Methanfaktor von 39,0 Nm³ dt⁻¹ war das Ergebnis eines am Institut für Landtechnik an der Universität für Bodenkultur in Wien durchgeführten Forschungsprojekts (AMON ET AL. 2005), welches sich auf österreichische Bedingungen bezog.

Die Variante Silomais als Zweitfrucht nach Grünroggen anzubauen, kann aber nur auf günstigen Standorten mit ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung empfohlen werden, d.h. auf Sandstandorten oder in höheren Lagen werden die Erwartungen an einen hohen Maisertrag im Zweitfruchtanbau nicht erfüllt (GRÖBLINGHOFF ET AL. 2005).

Bei allen Fruchtfolgen ist zu berücksichtigen, dass bei Vieh haltenden Betrieben zusätzlich noch Methanhektarerträge aus der vergorenen Rinder- bzw. Schweinegülle in Höhe von ca. 100–300 Nm³ pro Hektar Gesamtbetriebsfläche und Jahr anfallen (Tabelle 57).

Tabelle 57: Methanhektarerträge (Nm³ (ha a)⁻¹) der Rinder- bzw. Schweinegülle aus biologischen und konventionellen Betrieben

| Standorträume | Biologische Betriebe | | Konventionelle Betriebe | |
|---|------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| II. Übergangsbereich: Mostviertel- Eisenwurzen NORD | Schweinehaltung 212 | Rinderhaltung 252 | Schweinehaltung 81 | Rinderhaltung 321 |
| III. Nördliche Rand- alpen: Mostviertel- Eisenwurzen SÜD | Rinderhaltung 159 | | Rinderhaltung 197 | |

Eine zusätzliche Optimierung der Methanhektarerträge erscheint durch eine verstärkte Nutzung von Mischkultur- und Zweitkulturanbau sowie eine Erweiterung des Kulturartenspektrums möglich. So könnte beispielsweise die Einsaat von Weißklee in Energiemais sowohl zusätzliche

Pflanzenbiomasse produzieren als auch zur Verbesserung der Bodenstruktur, zur Erosionsminderung und zum Humusaufbau beitragen.

Ein weiteres Beispiel ist die von der Deutschen Saatveredelung (2005) für die Biogasproduktion empfohlene Kombination von überwinterndem Welschen Weidelgras als Vorfrucht zu Mais oder als Untersaat im Mais (Silomais bzw. Biogasmals). Die zusätzlichen Methangaserträge liegen im Bereich von ca. $1500 \text{ Nm}^3 (\text{ha a})^{-1}$. Das Welsche Weidelgras ist eine sehr ertragreiche Grasart, reagiert aber schon auf kurzzeitigen Wassermangel mit Wachstumsstillstand und ist deshalb nur in Gebieten mit sicheren Niederschlägen zu empfehlen. Die Niederschläge müssen über 550 mm pro Jahr liegen (FREYER ET AL. 2005). DIETL ET AL. (1998) sprechen sogar von einem Bedarf an über 900 mm Jahresniederschlag und einer mittleren Jahrestemperatur von 8–9°C, was einen Anbau nur in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD praktikabel machen würde. Im Gegensatz dazu wäre die Region Weinviertel zu trocken und in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD die Jahresdurchschnittstemperatur für eine Zweikulturnutzung zu gering. Eine Weidelgrasuntersaat in Mais wäre aber in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD durchaus möglich.

In der vorliegenden Studie wurde die Energiepflanze Sudangras nicht in die Modellfruchtfolgen miteinbezogen, da von regionstypischen Fruchtfolgen ausgegangen wurde, die dann unter den Aspekten der Studien von WALLA UND SCHNEEBERGER weiterentwickelt wurden. Schlussendlich wurden die maximal möglichen Methanhektarerträge von regionstypischen Fruchtfolgen für die verschiedenen Regionen, unter den standortüblichen Ertragsniveaus, erarbeitet. Sudangras ist aber eine interessante Energiepflanze und wie der Mais eine sehr wärmeliebende Kulturart (C4-Pflanze). Allerdings verträgt Sudangras wesentlich mehr Trockenheit als Mais. Sudangras ist selbstverträglich und stellt an die Vorfrucht keine besonderen Ansprüche. Aus den Versuchen von AMON (2002) ergaben sich Methanhektarerträge für Sudangras von 2740 bis 6248 $\text{Nm}^3 \text{ CH}_4 (\text{ha a})^{-1}$. Sudangras sollte in zukünftigen Studien miteingebunden werden, da es in Österreich bereits erfolgreich angebaut wird. Auf warmen, trockenen Standorten könnte Sudangras sogar eine Alternative zum Mais darstellen (ZWATZ 2005).

Ein weiterer, wichtiger Aspekt ist eine „Kaskadennutzung“, d.h. die gekoppelte Nutzung vegetativer und generativer Teile von ein- und derselben Pflanze. So könnten z.B. bei Sonnenblume und Raps die Körner zur Ölgewinnung verwendet werden und der dabei anfallende Presskuchen sowie die Restpflanze der Biogasproduktion zugeführt werden. Dies würde eine ganzheitliche und auch effiziente Verwendung von Kulturarten erreichen.

5.1.9 Düngerverwertung

Wenn man viehlose ökologische Betriebe betrachtet, ergeben sich bei einer Vergärung pflanzlicher Nebenprodukte (v.a. Klee gras, Zwischenfrüchte und Stroh) nicht nur zusätzliche Energie, sondern auch interessante pflanzenbauliche Möglichkeiten (STINNER ET AL. 2005). Mit den vergorenen Pflanzenresten stehen den Betrieben mobile Dünger zur Verfügung, die ähnlich wie Mist, Jauche oder Gülle in Vieh haltenden Systemen eingesetzt werden können. Weiters wird durch die Abfuhr der Pflanzenreste v.a. von Futterleguminosen die Auswaschungs- und Denitrifikationsgefahr vermindert. Auf der anderen Seite stehen diesem Vorteil Verluste bei Ernte, Zwischenlagerung und Ausbringung der Substrate (Gärreste) gegenüber (STINNER ET AL. 2005). Ammoniakemissionen und Stickstoffverluste durch Nitratauswaschung können aber wesentlich reduziert werden, wenn man auf die richtige Ausbringstechnik, den richtigen Zeit-

punkt und auf die richtige Menge achtet (EDER ET AL. 1997). SCHAUSS ET AL. (2005) zeigten in einer Studie, dass das Abführen von Stroh und Zwischenfruchtaufwüchsen zur Vergärung und das Ausbringen als vergorene Gülle die N₂O-Emissionen in Winterweizen und vorangegangener Zwischenfrucht im viehlosen ökologischen Landbau vermindert. Im konventionellen Landbau ist die Biogasgülle wegen ihrer höheren Gehalte an schnell verfügbarem Ammoniumstickstoff interessant. Dadurch kann der Bedarf an Mineraldüngerstickstoff weiter reduziert werden (SCHAAF 2005).

Der Anfall an Biogasgülle von vergorener Rinder- bzw. Schweinefrischgülle kann sich bei Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen reduzieren, da das gesamte Klee- und Futtergetreide in der Biogasanlage vergoren wird. Durch die Verringerung der Futtergrundlage muss der Viehbestand eventuell reduziert werden.

Bei den Fruchtfolgen für den Energiepflanzenanbau unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen stießen die biologischen Marktfruchtbetriebe im Weinviertel an die Höchstgrenze der N-Versorgung. Die Fruchtfolgesysteme aller biologischen Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD produzierten sogar einen N-Überschuss. Der biologische Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD hatte aufgrund der hohen Grünlandfläche keine Probleme mit einem N-Überschuss. Bei Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen (alle Haupt- und Nebenprodukte mit Ausnahme der Korn- bzw. Rübenerträge von Winterweizen, Dinkel und Zuckerrübe wurden in der Biogasanlage vergoren) wurde bei allen biologischen Fruchtfolgesystemen (Ausnahme wiederum der biologische Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD) ein hoher N-Überschuss produziert. Die konventionellen Fruchtfolgesysteme der Rinderbetriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD und Mostviertel-Eisenwurzen SÜD stießen an die Höchstgrenze der N-Versorgung und produzierten einen geringen Überschuss (Tabelle 58 und Tabelle 59).

Tabelle 58: Stickstoffüberschüsse biologischer Fruchtfolgesysteme bezogen auf die Gesamtbetriebsfläche in kg N (ha a)⁻¹

| Standorträume | Ohne Tierhaltung | | Mit Tierhaltung | | | |
|--|--|-------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | FF I | FF II | FF I | | FF II | |
| I. Trockengebiet: Weinviertel | ~ 0 | 70 | - | | - | |
| II. Übergangsbereich: Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 6 jährige FF: 77 5 jährige FF: 26 | 124 | Schweine- haltung 87 | Rinder- haltung 30 | Schweine- haltung 184 | Rinder- haltung 80 |
| III. Nördliche Rand- alpen: Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | - | - | Rinderhaltung kÜ | | Rinderhaltung kÜ | |

Legende: FF I = Fruchtfolgen unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen, FF II = Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen
kÜ = kein N-Überschuss, - = Betriebstyp ist für diese Region nicht typisch bzw. nicht vorhanden, ~ 0: liegt an der Höchstgrenze der N-Versorgung

Tabelle 59: Stickstoffüberschüsse konventioneller Fruchtfolgesysteme, bezogen auf die Gesamtbetriebsfläche in kg N (ha a)⁻¹

| Standorträume | Ohne Tierhaltung | | Mit Tierhaltung | | | |
|--|------------------|-------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | FF I | FF II | FF I | | FF II | |
| I. Trockengebiet: Weinviertel | kÜ | kÜ | – | | – | |
| II. Übergangsbereich: Mostviertel-Eisenwurzen NORD | kÜ | kÜ | Schweine- haltung kÜ | Rinder- haltung kÜ | Schweine- haltung kÜ | Rinder- haltung ~ 0 |
| III. Nördliche Rand- alpen: Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | – | – | Rinderhaltung kÜ | | Rinderhaltung ~ 0 | |

Legende: FF I = Fruchtfolgen unter Berücksichtigung ethischer und ökonomischer Rahmenbedingungen, FF II = Fruchtfolgen mit maximalen Methanhektarerträgen

kÜ = kein N-Überschuss, - = Betriebstyp ist für diese Region nicht typisch bzw. nicht vorhanden, ~ 0: liegt an der Höchstgrenze der N-Versorgung

Die Marktfruchtbetriebe haben Schwierigkeiten mit zu hohem N-Anfall, da sie nicht wie viehhaltende Betriebe Grünland zur N-Ausbringung zur Verfügung haben. Auch fast alle biologischen Betriebe haben das Problem mit zuviel N-Anfall, da die Fruchtfolgesysteme durch Luzerne- und Klee gras ihre Stickstoffversorgung nachhaltig gewährleisten. Da diese Kulturen auch hohe Methanhektarerträge bringen, blieben sie naturgemäß in der Fruchtfolge. Das bedeutete aber, dass Luzerne- und Klee gras nicht nur durch ihre Stoppel- und Wurzelrückstände die Fruchtfolge mit Stickstoff versorgen, sondern zusätzlich noch durch den N-Anfall ihrer Gärsubstrate. Für diese Betriebe müssen Düngeverwertungsstrategien entworfen werden, denn die Umstellung auf stickstoffzehrende Fruchtfolgesysteme (wie im konventionellen Landbau üblich) würde keine Nachhaltigkeit gewährleisten.

Konventionelle Betriebe, die höhere N-Mengen ausbringen dürfen und selten Futterleguminosen anbauen, haben keine Probleme mit zu hohen N-Überschüssen. Der konventionelle Rinderbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD und auch GRONAUER und BACHMAIER (2005) sehen einen Konflikt bezüglich des N-Anfalls und meinen, dass mehr Flächen für die Ausbringung der Gärreste notwendig sind als für den Anbau der nachwachsenden Rohstoffe. Zu diesem Ergebnis kommt auch die vorliegende Studie für die biologischen Fruchtfolgesysteme.

Bei der Bewertung der Höhe der N-Überschüsse ist zu berücksichtigen, dass in den Berechnungen davon ausgegangen wurde, dass weder bei der Lagerung noch bei der Ausbringung der Biogasgülle Verluste auftreten. Durch geeignete Ausbringungstechniken, wie z.B. Schleppschläuche mit anschließender Einarbeitung, lassen sich Verluste weitgehend minimieren. Lagerverluste sind jedoch vor allem im Winter unvermeidbar, wenn keine Gülleausbringung möglich ist. Die N-Überschüsse reduzieren sich dementsprechend.

5.1.10 Fazit

Die erzielten Ergebnisse sind erste Ansätze, die vor dem Hintergrund der neuen Möglichkeit der Biogaserzeugung mit Gärrohstoffen aus Kultursystemen des Ackerbaus und der Grünlandnutzung am Beispiel dreier Standorte in Österreich entwickelt wurden. Fruchtfolge-, Kultur- und Nutzungssysteme sind für die ökologische, ökonomische, technische Effizienz und die sozio-ökonomische Leistungsfähigkeit der Biogas-, bzw. Biomethangewinnung in Landbausystemen von herausragender Bedeutung. In weiterer Folge sollen deshalb Landbausysteme entwickelt werden, in denen die Biogaserzeugung als Schlüsseltechnologie der Zukunft systemimmanenter Bestandteil der Landbausysteme, aber auch der Kulturlandschaften und Gesellschaft insgesamt ist.

5.2 Vorbehandlung der Energiepflanzen vor dem Einbringen in den Fermenter (Arbeitsschwerpunkt 1.4)

Es wurde die Wirkung von Vorbehandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute von Energiepflanzen untersucht. Für diese Untersuchung wurden folgende Energiepflanzen verwendet:

- Frische Getreideganzpflanzen (Triticale und Weizen)
- Kleereiche Wiesengrassilage
- Sonnenblumensilage

An allen Energiepflanzen wurden die gleichen Vorbehandlungsmaßnahmen getestet. Insgesamt gab es fünf Behandlungsstufen:

1. Keine Behandlung
2. Voransäuern
3. Hitzebehandlung
4. Mikrowellenbestrahlung
5. IPUS meth-max[®]-Behandlung

Die Voransäuerung erfolgte mit Zitronensäure ($C_6H_8O_7$). Jede Probe (30 g FM) wurde mit einer 20 % Zitronensäurelösung (60 g) vermischt und für 24 Stunden bei Raumtemperatur (20°C) inkubiert. Durch die Zugabe von Zitronensäure wurden keine sichtbaren Veränderungen der Proben beobachtet. Es kam auch zu keiner Erwärmung der Proben durch die Zumischung der Säure. Beim Befüllen der Gärbehälter wurde aber mit der Zugabe des Impfmateri als eine starke Schaumbildung und Erwärmung bis auf 40°C beobachtet. Das bedeutet, dass das Impfmateri als, das einen mittleren pH-Wert von 7,6 besaß, mit den Probenmischungen, die einen pH-Wert von ca. 3,5 hatten, reagierte. Zur Neutralisierung wurde zu den Gärbehältern mit dieser Behandlung 100 bis 150 ml 2 % NaOH dazugegeben (Triticale, 120 ml, Weizen, 150 ml, Wiesengras, 120 ml und Sonnenblumensilage, 110 ml), wodurch der pH-Wert wieder auf 7,5 anstieg.

Die Hitzebehandlung erfolgte mit Wasserdampf. Die Energiepflanzenproben wurden dazu im Schnellkochtopf unter 0,4–0,8 Bar Druck und bei 109–116°C Temperatur ohne zusätzlichen Wasserzusatz für eine Stunde behandelt.

Zur Behandlung der Proben mit Mikrowellen wurden die Proben unter Zugabe von 200 g Wasser für 15 Minuten in ein Mikrowellengerät mit 560 Watt Leistung gegeben.

Die fünfte Behandlung wurde zusätzlich zu den im Antrag beschriebenen Behandlungen durchgeführt, sie bestand in einer Zugabe von Tonmineralen (IPUS meth-max[®], vormals IPUS-zeo-lift-biokat). Den verschiedenen Energiepflanzen wurde jeweils 5 % (bezogen auf die Probentrockenmasse) der Substanz IPUS meth-max[®] zugesetzt.

Tabelle 60 gibt die spezifische Biogas- und Methanausbeute der behandelten und unbehandelten Energiepflanzen wieder.

Tabelle 60. Spezifische Biogas- und Methanausbeute unterschiedlich behandelter Energiepflanzen

| Energiepflanze | Behandlung | Biogasausbeute [NI Biogas (kg oTS) ⁻¹] | | | | Methanausbeute [NI CH ₄ (kg oTS) ⁻¹] | | | |
|----------------|------------------|---|---|-------|------------------------------------|--|---|-------|------------------------------------|
| | | Mittelwert | n | STABW | relativ zur unbehandelten Variante | Mittelwert | n | STABW | relativ zur unbehandelten Variante |
| Triticale | Unbehandelt | 471 | 5 | 17,3 | 100 | 269 | 5 | 16,3 | 100 |
| | Dampfbehandelt | 495 | 5 | 7,9 | 105 | 279 | 5 | 4,7 | 104 |
| | mikrow.behandelt | 493 | 5 | 18,7 | 105 | 231 | 5 | 9,3 | 86 |
| | Säurebehandelt | 471 | 5 | 33,6 | 100 | 250 | 5 | 18,1 | 93 |
| | IPUS m-m | 517 | 5 | 17,8 | 110 | 302 | 5 | 6,5 | 112 |
| Weizen | Unbehandelt | 665 | 3 | 0,6 | 100 | 365 | 3 | 2,5 | 100 |
| | Dampfbehandelt | 601 | 3 | 0,8 | 90 | 345 | 3 | 1,5 | 95 |
| | mikrow.behandelt | 617 | 3 | 48,0 | 93 | 358 | 3 | 28,0 | 98 |
| | Säurebehandelt | 597 | 3 | 17,3 | 90 | 323 | 3 | 27,6 | 88 |
| | IPUS m-m | 653 | 3 | 24,5 | 103 | 414 | 3 | 19,3 | 122 |
| Wiesengras | Unbehandelt | 577 | 3 | 12,7 | 100 | 309 | 3 | 8,7 | 100 |
| | Dampfbehandelt | 682 | 3 | 50,3 | 118 | 380 | 3 | 27,6 | 123 |
| | mikrow.behandelt | 737 | 3 | 44,7 | 128 | 399 | 3 | 26,4 | 129 |
| | Säurebehandelt | 504 | 3 | 45,8 | 87 | 282 | 3 | 10,0 | 91 |
| | IPUS m-m | 684 | 3 | 23,8 | 122 | 344 | 3 | 8,6 | 116 |
| Sonnenblumen | Unbehandelt | 439 | 3 | 20,7 | 100 | 243 | 3 | 10,4 | 100 |
| | Dampfbehandelt | 649 | 3 | 18,7 | 148 | 402 | 3 | 9,3 | 165 |
| | mikrow.behandelt | 709 | 3 | 25,8 | 162 | 443 | 3 | 12,3 | 182 |
| | Säurebehandelt | 476 | 3 | 30,6 | 108 | 281 | 3 | 15,3 | 116 |
| | IPUS m-m | 464 | 3 | 13,8 | 106 | 298 | 3 | 9,2 | 123 |

Für die Energiepflanze Triticale ergab sich im Vergleich zur unbehandelten Variante durch die Behandlung mit Dampf, Mikrowelle und IPUS meth-max[®] ein leichter Anstieg in der Biogasausbeute (5–10 %). In Bezug auf die Methanausbeute besaßen aber nur noch die Behandlungsmaßnahmen Dampf (4 %) und IPUS meth-max[®] (12 %) einen positiven Einfluss.

Bei der zweiten Getreidepflanze, dem Weizen, hatten die verschiedenen Behandlungsmaßnahmen zumeist einen negativen Einfluss auf die Biogas- und Methanausbeute. Nur die IPUS meth-max[®]-Behandlung zeigte eine im Vergleich zur unbehandelten Variante gesteigerte Biogas- (3 %) und Methanausbeute (22 %).

Eine Behandlung mit Dampf, Mikrowelle oder IPUS meth-max[®] zeigte für das Wiesengras eine steigernde Wirkung hinsichtlich der Biogas- und Methanausbeute. Relativ zur unbehandelten Variante erhöhte eine Dampfbehandlung die Methanausbeute um 23 %, eine IPUS meth-max[®]-Behandlung um 16 % und eine Mikrowellenbehandlung sogar um 29 %. Eine Säurebehandlung hemmte die Methanausbeute im Vergleich zur unbehandelten Variante um 9 %.

In Kombination mit Sonnenblumensilage zeigten alle Behandlungen einen positiven Einfluss auf die Biogas- und Methanausbeute. Im Vergleich zur unbehandelten Variante ergab sich durch die Säurebehandlung eine Erhöhung der Methanausbeute um 16 %, die Zugabe von IPUS meth-max[®] erhöhte die Methanausbeute um 23 %, die Dampfbehandlung um 65 % und die Mikrowellenbehandlung sogar um 82 %.

In Abbildung 27 ist die Wirkung der verschiedenen Behandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute von Triticale, Weizen, Wiesengras (W.Gras) und Sonnenblumen (SB) graphisch dargestellt. „Impfsubstrat“ bezeichnet die Methanausbeute aus Gärbehältern, die nur das Impfsubstrat und keine Probe enthielten.

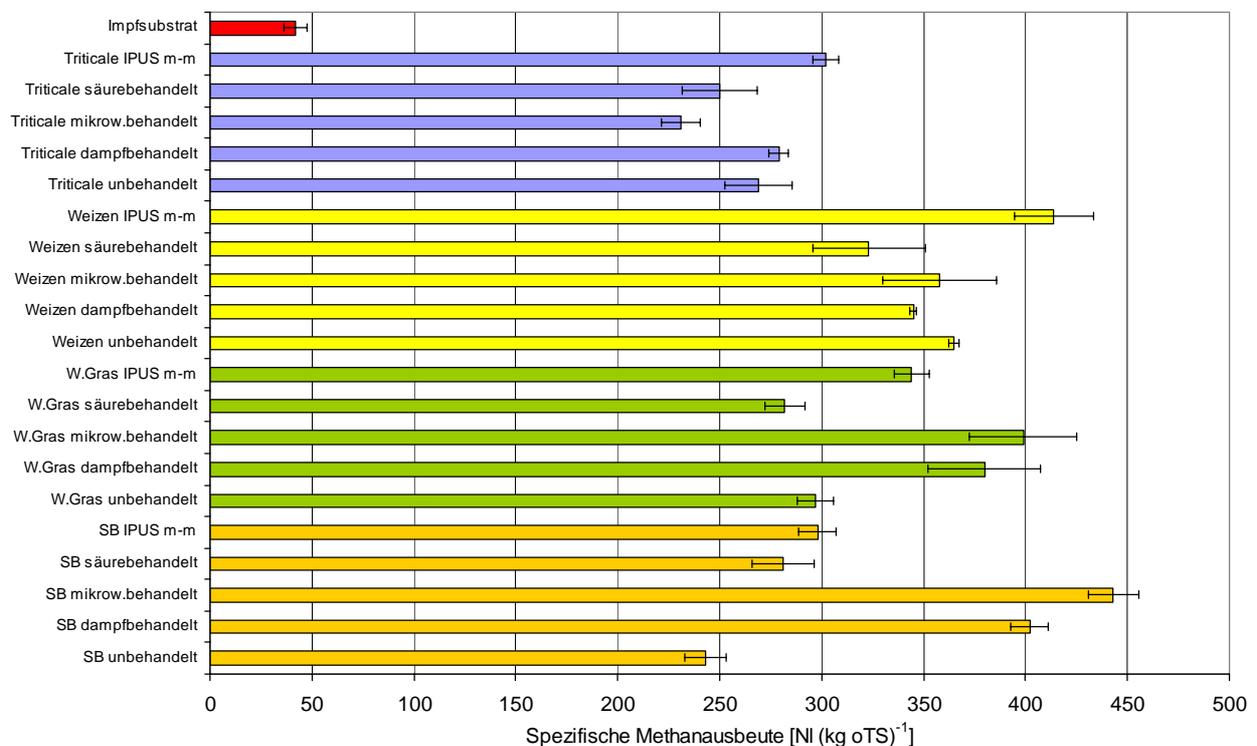


Abbildung 27. Einfluss verschiedener Vorbehandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute

Aus der Abbildung lässt sich gut ablesen, dass die verschiedenen Behandlungsmaßnahmen in den verschiedenen Energiepflanzen zum Teil eine unterschiedliche Wirkung besaßen, d.h. dass die Wirkung einer Behandlung pflanzenartsspezifisch sein kann. Eine Dampfbehandlung führte bei Sonnenblumen und Wiesengras zu einer wesentlichen Erhöhung der Methanausbeute (65 und 23 %). Bei Triticale war die Steigerung durch die Dampfbehandlung nur minimal (4 %) und im Fall des Weizens kam es sogar zu einer Absenkung der Methanausbeute (5 %).

Eine Behandlung mit Mikrowellen zeigte ebenfalls nur bei den Silagen (Sonnenblumen und Wiesengras) einen positiven Effekt auf die Methanausbeute (82 und 29 %). Der Einsatz von

Mikrowelle beim Getreide (Weizen und Triticale) führte zu einer Absenkung der Methanausbeute um 2 bzw. 14 %.

Die Säurebehandlung mit Zitronensäure zeigte nur im Zusammenhang mit der Sonnenblumensilage einen steigernden Effekt (16 %) auf die spezifische Methanausbeute. Bei den anderen Energiepflanzen (Wiesengras, Weizen und Triticale) bewirkte die Säurebehandlung eine Reduktion der Methanausbeute um 7 bis 12 %.

Eine Ausnahme bildete der Zusatz an Tonmineralen (IPUS meth-max[®]): Durch diese Behandlung wurde für alle Energiepflanzen die spezifische Methanausbeute gesteigert (um 12 % für Triticale, um 16 % für Wiesengras, um 22 % für Weizen und um 23 % für Sonnenblumen).

Die Behandlungsmaßnahmen Dampf, Mikrowellen und Säure zielten darauf ab, einen Voraufschluss der Rohfaserfraktion zu bewirken und somit die Verfügbarkeit der Nährstoffe im anaeroben Abbau zu verbessern. Die vorliegenden Ergebnisse deuten an, dass diese Wirkung nur bei den Energiepflanzen Wiesengras und Sonnenblumen zu erreichen ist, nicht aber für das Getreide. Es bleibt aber zu testen, ob es einen Einfluss auf die Wirkung dieser Behandlungsmaßnahmen gehabt hat, dass Wiesengras und Sonnenblumen als Silage eingesetzt wurden und das Getreide im frischen Zustand. Zusätzlich könnte auch das Vegetationsstadium, in dem die Gärrohstoffe geerntet wurden, das Ausmaß der Wirkung der Vorbehandlungsmaßnahmen beeinflusst haben, da sich der Gehalt und die Zusammensetzung der Rohfaser im Verlauf der Vegetation verändern.

Die positive Wirkung von IPUS meth-max[®] auf die spezifische Methanausbeute erklärt sich durch seine physikalische Struktur und chemischen Eigenschaften. Der Zusatz IPUS meth-max[®] wirkt auf der Basis von natürlichen nanoporösen Alumosilikat-Mineralien, die durch ein patentiertes Verfahren zur Aktivierung modifiziert werden. Sie sollen in Wechselwirkung mit der aktiven mikrobiellen Biomasse und der chemischen Zusammensetzung der in anaerober Umsetzung befindlichen Gärsubstrate eine stabilisierende und ertragssteigernde Wirkung erzielen. Die große innere Oberfläche des Zusatzes, bedingt durch Nanoporen im Kristallgitter, bindet reversibel Stoffe wie Ammonium und Carbonsäuren, die bei Überschreiten kritischer Grenzwerte eine Hemmung der Methanbildung auslösen, wie sie vor allem beim Vergären eiweißreicher Substrate häufig auftreten. Zusätzlich ist auch denkbar, dass sich durch den Tonmineraleinsatz die Versorgung der Mikroorganismen mit Spurennährstoffen verbessert und dies ebenfalls zu einer Steigerung der Methanbildung beitragen kann.

5.3 Substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit der Energiepflanzen im Fermenter (Arbeitsschwerpunkt 1.5)

Die substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit ist ein wichtiger Kennwert, um Biogasfermenter korrekt dimensionieren zu können. Die erforderliche hydraulische Verweilzeit für verschiedene Energiepflanzen wurde aus der zeitlichen Entwicklung der kumulierten spezifischen Methanausbeute in den Laborversuchen abgeleitet. Die Messzeiträume in den Laborversuchen betragen zwischen 40 und 60 Tagen. Die Gärung wurde ab dem Zeitpunkt als vollständig betrachtet, ab dem 95 % der maximal möglichen Methanmenge gebildet worden waren.

Tabelle 61 gibt die substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit der verschiedenen im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzen in Kombination mit unterschiedlichen Behandlungsmaßnahmen wieder.

Tabelle 61. Substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit unterschiedlich behandelter Energiepflanzen

| Energiepflanze | Optimale hydraulische Verweilzeit in Tagen | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|---|-------|-------------------|----|-------|----------------|---|-------|-------------------------------|---|-------|
| | Frische Biomasse | | | Silierte Biomasse | | | Wärmebehandelt | | | Bei Zulage von IPUS meth-max® | | |
| | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW |
| Getreide | – | – | – | 18,0 | 84 | 5,8 | 26,1 | 9 | 5,1 | 19,5 | 6 | 1,7 |
| Gras 2004 | – | – | – | 36,0 | 3 | 0,9 | 40,1 | 6 | 0,9 | 39,0 | 3 | 3,2 |
| W.Grass 2005 extensiv | 25,2 | 6 | 0,6 | 24,5 | 21 | 1,4 | – | – | – | – | – | – |
| W.Grass 2005 intensiv | 23,1 | | 4,6 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Sonnenblumen 2004 | – | – | – | 38,1 | 3 | 1,7 | 46,0 | 6 | 1,1 | – | – | – |
| Sonnenblumen 2005 | – | – | – | 20,9 | 36 | 1,3 | – | – | – | 21,0 | 6 | 1,4 |
| Mais | – | – | – | 24,3 | 18 | 5,1 | – | – | – | – | – | – |

Unter den gleichen, kontrollierten Laborbedingungen ergaben sich für die verschiedenen Energiepflanzen recht unterschiedliche optimale hydraulische Verweilzeiten. Die optimale hydraulische Verweilzeit für silierte Getreideganzpflanzen lag bei 18 Tagen, eine Wärmebehandlung oder die Zugabe von Tonmineralen (Inpus meth-max®) erhöhte die optimale hydraulische Verweilzeit um 8,1 bzw. 1,5 Tage. Aus frischer Biomasse ergaben sich für Wiesengras optimale hydraulische Verweilzeiten, die bei 23 (intensive Nutzung) bzw. 25 Tagen (extensive Nutzung) lagen. Für Wiesengras aus extensiver Nutzung sank die optimale hydraulische Verweilzeit um 0,7 Tage, wenn die Biomasse vor der Vergärung siliert wurde. Wiesengrassilage aus dem Jahr 2004 hatte dagegen eine durchschnittliche optimale hydraulische Verweilzeit von 36 Tagen. Wenn diese Silage wärmebehandelt wurde oder IPUS meth-max® zugegeben wurde, erhöhte sich die optimale hydraulische Verweilzeit um 4,1 bzw. 3 Tage. Es wurden zwei verschiedene Sonnenblumensilagen (Ernte 2004 und 2005) untersucht. Für die Sonnenblumensilage aus dem Erntejahr 2004 ergab sich eine optimale hydraulische Verweilzeit von 38 Tagen, für die Sonnenblumensilage aus dem Erntejahr 2005 eine um 17 Tage kürzere. Wie auch schon für die Energiepflanzen Getreide und Wiesengras zeigte es sich für die Sonnenblumensilagen, dass eine Wärmebehandlung oder die Zugabe von Tonmineralen die Vergärung verlängert bzw. die optimale hydraulische Verweilzeit erhöht. Für Silomais ergab sich eine mittlere optimale hydraulische Verweilzeit von 24 Tagen.

Im Vergleich aller Energiepflanzen besaßen die Silagen aus Getreideganzpflanzen im Durchschnitt die niedrigste optimale hydraulische Verweilzeit. Die höchsten optimalen hydraulischen Verweilzeiten ergaben sich für Wiesengras und Sonnenblumen, jeweils aus dem Erntejahr 2004. Die hohen optimalen hydraulischen Verweilzeiten des Erntejahres 2004 können eventuell auf eine im Vergleich zum Erntejahr 2005 veränderte Nährstoffzusammensetzung der Biomasse zurückzuführen sein.

Für eine Empfehlung für die Praxis wird der optimalen hydraulischen Verweilzeit, die unter Laborbedingungen bestimmt wurde, ein Sicherheitszuschlag von 10 % dazu addiert. Dadurch ergeben sich für die verschiedenen Energiepflanzen die folgenden Empfehlungen für eine optimale hydraulische Verweilzeit unter Praxisbedingungen (unter der Annahme, dass die Gärtemperatur 40°C beträgt und keine Vorbehandlungen durchgeführt werden):

- Getreideganzpflanzensilagen: 20 Tage
- Wiesen gras frisch: 27 Tage
- Wiesen grassilage: 27 bis 40 Tage
- Sonnenblumensilage: 23 bis 42 Tage
- Maissilagen: 27 Tage

5.4 Sicherer Gärverlauf und hoher Gasertrag durch das Methanenergiewertmodell (Arbeitsschwerpunkt 2.1)

Mit dem Methanenergiewertmodell (MEWM) wird der Einfluss einzelner Pflanzeninhaltsstoffe auf das Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen bei der Biogaserzeugung bestimmt. Das spezifische Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen steht im direkten Zusammenhang zur Inhaltsstoffzusammensetzung der Energiepflanzen. Es können dadurch Gleichungen zur Schätzung des Methanenergiewerts (MEW) der Energiepflanzen kalkuliert werden. Den Schätzgleichungen im Methanenergiewertmodell liegt ein multiples und lineares Regressionsmodell folgender allgemeiner Form zugrunde:

$$\begin{aligned} \text{Methanenergiewert [NI CH}_4 \text{ (kg oTS)}^{-1}] = & x_1 \times \text{Rohprotein [\% TM]} \\ & + x_2 \times \text{Rohfett [\% TM]} \\ & + x_3 \times \text{Rohfaser [\% TM]} \\ & + x_4 \times \text{N-freie Extraktstoffe [\% TM]} \end{aligned}$$

Auf der Datenbasis vorhergehender Untersuchungen (Mais) und des vorliegenden Projekts können nunmehr erste Schätzgleichungen für die Berechnung des Methanenergiewerts für Mais, Getreide, Sonnenblumen und Wiesen gras angegeben werden (Tabelle 62, Tabelle 63, Tabelle 64 und Tabelle 65). In den Tabellen werden zu den einzelnen Inhaltsstoffen die Regressionskoeffizienten für die Schätzgleichung mit dem ermittelten Signifikanzniveau für die Regressionskoeffizienten angegeben. Die Regressionskoeffizienten spiegeln den jeweiligen Einfluss der einzelnen Pflanzeninhaltsstoffe auf das Methanbildungsvermögen der Energiepflanzen wider.

Aufgrund vorhergehender Untersuchungen basiert das Methanenergiewertmodell für die Energiepflanze Mais derzeit auf 95 Datensätzen (Tabelle 62). Dies gibt der Schätzgleichung zur Kalkulation des Methanenergiewerts von Mais eine hohe Genauigkeit. Alle Inhaltsstoffe des Mais (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) haben einen steigernden Effekt auf den Methanenergiewert. Den höchsten Effekt besitzt der Rohfettgehalt im Mais.

Tabelle 62. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Mais anhand der Rohnährstoffe

| Inhaltsstoff | Regressionskoeffizient | Signifikanz |
|---|------------------------|-------------|
| Rohprotein | 15,27 | 0,000 |
| Rohfett | 28,38 | 0,001 |
| Rohfaser | 4,54 | 0,000 |
| N-freie Extraktstoffe | 1,12 | 0,008 |
| Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R ² = 0,968; F-Wert = 1583,027; Durbin-Watson-Wert = 1,176; Signifikanzniveau = 0,000; n = 95 | | |

Das Methanenergiemodell für Mais ist nun soweit, dass es dazu verwendet werden kann, den Methanenergiewert von Mais anhand der Inhaltsstoffe (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) zu schätzen. Die Werte für die Inhaltsstoffe können entweder Futterwertta-bellen (z.B. DLG) entnommen werden oder aber direkt im Probenmaterial vom Mais bestimmt werden (Weender-Rohnährstoffanalyse).

Das Methanenergiewertmodell für das Getreide basiert derzeit nur auf 20 Datensätzen (Tabelle 63). Der Regressionskoeffizient für den Inhaltsstoff Rohfett war nicht signifikant, Rohfett ist daher nicht in der Tabelle aufgeführt. Eine umfangreichere Datengrundlage zum Getreide könnte eventuell dazu führen, dass der Inhaltsstoff Rohfett signifikant wird und in die Schätzge-leichung Eingang findet. Wie im Methanenergiewertmodell für den Mais waren auch im Me-thanenergiewertmodell für das Getreide alle Regressionskoeffizienten positiv. Der höchste Wert ergab sich für den Inhaltsstoff Rohprotein.

Tabelle 63. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Getreide anhand der Rohnährstoffe

| Inhaltsstoff | Regressionskoeffizient | Signifikanz |
|--|------------------------|-------------|
| Rohprotein | 5,904 | 0,004 |
| Rohfaser | 3,791 | 0,001 |
| N-freie Extraktstoffe | 1,352 | 0,015 |
| Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: $R^2 = 0,985$; F-Wert = 371,739; Durbin-Watson-Wert = 2,442; Signifikanzniveau = 0,000; n = 20 | | |

Nur auf 15 Datensätzen basiert derzeit das Methanenergiewertmodell für die Sonnenblumen (Tabelle 64). Dieser Datenumfang scheint zu gering zu sein, da die Regressionskoeffizienten der meisten Inhaltsstoffe (Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) nicht signifikant waren.

Tabelle 64. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Sonnenblumen anhand der Rohnährstoffe

| Inhaltsstoff | Regressionskoeffizient | Signifikanz |
|---|------------------------|-------------|
| Rohprotein | 2,152 | 0,006 |
| Rohfett | 0,916 | 0,856 |
| Rohfaser | -1,740 | 0,846 |
| N-freie Extraktstoffe | 7,430 | 0,212 |
| Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: $R^2 = 0,928$; F-Wert = 35,513; Durbin-Watson-Wert = 1,361; Signifikanzniveau = 0,000; n = 15 | | |

Auch im Methanenergiewertmodell für das Wiesen-gras waren die Regressionskoeffizienten von drei Inhaltsstoffen (Rohprotein, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) nicht signifikant (Tabelle 65). Für die Energiepflanze Wiesen-gras gibt es derzeit eine Datenbasis von 40 Datensätzen.

Tabelle 65. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewerts von Wiesen-
gras anhand der Rohnährstoffe

| Inhaltsstoff | Regressionskoeffizient | Signifikanz |
|--|------------------------|-------------|
| Rohprotein | 2,188 | 0,602 |
| Rohfett | 31,379 | 0,017 |
| Rohfaser | 1,476 | 0,457 |
| N-freie Extraktstoffe | 1,849 | 0,217 |
| Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R ² = 0,935; F-Wert = 128,976; Durbin-Watson-Wert = 0,804; Signifikanzniveau = 0,000; n = 40 | | |

Mit Ausnahme des Methanenergiewertmodells für Mais werden für alle anderen Methanenergiewertmodelle (Getreide, Sonnenblumen und Wiesen-
gras) noch zusätzliche Datensätze benötigt, um eine aussagekräftige Schätzgleichung zur Kalkulation des Methanenergiewerts dieser
Energiepflanzen zu erhalten.

5.5 Hohe Biogasqualität (Arbeitsschwerpunkt 2.2)

Einfluss des Eiweiß:Energie-Verhältnis

Der Einfluss des Eiweiß:Energie-Verhältnisses in Gärgutmischungen von Energiepflanzen auf
das spezifische Methanbildungsvermögen und auf die Biogasqualität wurde mit Hilfe von jun-
ger, eiweißreicher Kleegrassilage und energiereicher Maissilage untersucht (Tabelle 66).

Tabelle 66. Inhaltsstoffzusammensetzung der eingesetzten Gärgüter

| Inhaltsstoff | Maissilage | Kleegrassilage | Mais- und Kleegrassilage (50 : 50) |
|------------------------------|------------|----------------|---------------------------------------|
| TM (% FM) | 32,83 | 46,96 | 43,74 |
| oTS (% FM) | 31,92 | 42,79 | 41,06 |
| Rohprotein (% TM) | 7,75 | 20,13 | 14,31 |
| Rohfett (% TM) | 2,83 | 4,02 | 3,43 |
| Rohfaser (% TM) | 20,65 | 25,43 | 22,50 |
| Rohasche (% TM) | 2,75 | 8,88 | 6,12 |
| N-freie Extraktstoffe (% TM) | 66,02 | 41,53 | 53,64 |
| Kohlenstoff (% TM) | 50,19 | 50,53 | 51,54 |
| Stickstoff (% TM) | 1,14 | 2,79 | 2,49 |
| Kohlenstoff : Stickstoff | 44,51 | 18,31 | 20,70 |
| Ammoniumstickstoff (g/kg FM) | 0,45 | 1,28 | 0,86 |
| Bruttoenergie (MJ/kg TM) | 17,32 | 17,61 | 17,47 |
| Rohprotein : Bruttoenergie | 0,44 | 1,14 | 0,81 |
| pH-Wert | 3,83 | 4,38 | 4,47 |

FM Frischmasse, TM Trockenmasse, oTS organische Trockensubstanz

Die eingesetzte Maissilage hatte einen Rohproteingehalt von 7,75 %, im Vergleich dazu lag der
Rohproteingehalt in der Kleegrassilage bei 20,13 %. Auch der Gehalt an Trockenmasse, organi-
scher Trockensubstanz, Rohfett, Rohfaser, Rohasche und Ammoniumstickstoff lag in der Klee-

grassilage höher als in der Maissilage. Nur der Gehalt an N-freien Extraktstoffen war in der Maissilage im Vergleich zur Kleegrassilage höher. Der Kohlenstoffgehalt (C) der beiden Silagen glich sich, doch aufgrund des unterschiedlichen Stickstoffgehalts (N) ergab sich für das C:N-Verhältnis ein Wert von 44,51 für die Maissilage und ein um mehr als die Hälfte geringerer Wert von 18,31 für die Kleegrassilage. Der Bruttoenergiegehalt der beiden Silagen unterschied sich nicht groß voneinander, doch das Verhältnis Rohprotein:Bruttoenergie war in der Kleegrassilage um mehr als das 2,5-fache weiter als in der Maissilage. Der gemessene pH-Wert der Maissilage lag bei 3,83, in der Kleegrassilage bei 4,38.

Um unterschiedliche Eiweiß:Energie-Verhältnisse testen zu können, wurde die eiweißreiche Kleegrassilage mit der energiereichen Maissilage in 11 Stufen kombiniert (Tabelle 67) und in jeweils vier Wiederholungen im Laborversuch vergoren. Beispielhaft ist die Zusammensetzung einer 50:50 Mischung aus Mais- und Kleegrassilage in Tabelle 66 wiedergegeben.

Tabelle 67. Zusammensetzung der Mischungen aus Mais- und Kleegrassilage, sowie Einwaagemengen im Stoffwechselversuch und oTS-Zusammensetzung der Mischungen

| Mischvarianten | | | Einwaage in Gärbehälter (g FM) | | Anteil an oTS in der Mischung (%) | |
|----------------|----------------|-----------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| Maissilage | Kleegrassilage | Abkürzung | Maissilage | Kleegrassilage | Maissilage | Kleegrassilage |
| 10 % | 90 % | GM1 | 7,0 | 43,0 | 10,2 | 89,8 |
| 20 % | 80 % | GM2 | 13,5 | 36,5 | 20,6 | 79,5 |
| 30 % | 70 % | GM3 | 19,0 | 31,0 | 30,0 | 70,0 |
| 40 % | 60 % | GM4 | 24,5 | 25,5 | 40,2 | 59,8 |
| 50 % | 50 % | GM5 | 29,5 | 20,5 | 50,2 | 49,9 |
| 60 % | 40 % | GM6 | 34,5 | 16,0 | 60,1 | 39,9 |
| 70 % | 30 % | GM7 | 38,5 | 11,5 | 70,1 | 29,9 |
| 80 % | 20 % | GM8 | 42,5 | 7,5 | 79,9 | 20,2 |
| 90 % | 10 % | GM9 | 46,5 | 3,5 | 90,3 | 9,7 |
| 100 % | – | GM10 | 50,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |
| – | 100 % | GM11 | 0,0 | 50,0 | 0,0 | 100,0 |

FM Frischmasse, oTS organische Trockensubstanz

Bei der Vergärung von 100 % Maissilage wurde ein spezifischer Methanertrag von 337 NI (kg oTS)⁻¹ erzielt (Tabelle 68). Der Einsatz von 100 % Kleegrassilage zeigte einen spezifischen Methanertrag von 283 NI (kg oTS)⁻¹. Der höhere spezifische Methanertrag der Maissilage lässt sich aus dem höheren Anteil an N-freien Extraktstoffen ableiten, d.h. die Maissilage hatte eine höhere Konzentration an gut vergärbaren Stärke und Zucker. Der spezifische Methanertrag der Mischungen aus Mais- und Kleegrassilage lag in einem Bereich von 271 NI (kg oTS)⁻¹ (10 % Maissilage) und 319 NI (kg oTS)⁻¹ (90 % Maissilage). Das heißt, je höher der Anteil an Maissilage in der Mischung, desto höher der spezifische Methanertrag. Mit keiner der Mischungen wurde ein Methanertrag vergleichbar mit der Variante 100 % Maissilage erreicht. Aus den vorliegenden Daten lässt sich daher ableiten, dass bei der Vergärung von Mischungen aus Mais- und Kleegrassilage sich der spezifische Methanertrag additiv verhält. Das heißt, dass sich der spezifische Methanertrag von Mischungen durch eine anteilige Addition des spezifischen Methanertrages dieser Gärgüter berechnen lassen kann. Die unterschiedliche Nährstoffzusam-

mensetzung der Gärgüter, ihr unterschiedliches C:N-Verhältnis und Eiweiß:Energie-Verhältnis ergaben keine Cofermentationswirkungen in den Mischungen.

Tabelle 68. Spezifischer Methanertrag von Gärgutmischungen

| Mischvarianten | | Methanertrag (NI (kg oTS) ⁻¹) | | |
|----------------|----------------|---|---|-------|
| Maissilage | Kleegrassilage | Mittelwert | n | STABW |
| 10 % | 90 % | 271 | 3 | 8,0 |
| 20 % | 80 % | 269 | 3 | 4,8 |
| 30 % | 70 % | 297 | 3 | 41,2 |
| 40 % | 60 % | 297 | 3 | 5,5 |
| 50 % | 50 % | 297 | 3 | 5,9 |
| 60 % | 40 % | 319 | 3 | 11,1 |
| 70 % | 30 % | 320 | 3 | 3,1 |
| 80 % | 20 % | 319 | 3 | 6,4 |
| 90 % | 10 % | 319 | 3 | 6,6 |
| 100 % | – | 337 | 3 | 2,0 |
| – | 100 % | 283 | 3 | 6,3 |

NI Normliter, oTS organische Trockensubstanz, n Zahl der Messwerte

Tabelle 69 gibt die Zusammensetzung des Biogases wieder, das bei der Vergärung der verschiedenen Mischungen an Mais- und Kleegrassilage entstand. Die vorliegenden Daten zeigen deutlich auf, dass das Eiweiß:Energie-Verhältnis im Gärgut den Gehalt an Methan, Schwefelwasserstoff und Ammoniak im Biogas, und damit die Biogasqualität, beeinflusst. Je höher der Einweißgehalt bzw. der Anteil an Kleegrassilage in der Gärgutmischung, desto niedriger lag der Methangehalt und desto höher der Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im produzierten Biogas

Bei der Vergärung von 100 % Kleegrassilage wurde im produzierten Biogas 1510 ppm Schwefelwasserstoff, 125 ppm Ammoniak und 60,2 % Methan gemessen. Wurden 100 % Maissilage vergärt, ergab sich ein Methangehalt im Biogas von 63 % und Schwefelwasserstoff- und Ammoniakmesswerte von 323 bzw. 90 ppm. Schwefelwasserstoff und Ammoniak hemmen die Abbauprozesse durch direkte Hemmung der beteiligten Mikroorganismen.

Abbildung 28 zeigt den Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas der Gärgutmischungen im Verlauf der Vergärung auf. Die höchsten Gehalte an Schwefelwasserstoff wurden in der ersten Hälfte der Vergärung (Tag 0–25) gemessen. Im Gegensatz dazu wurden die höchsten Ammoniakgehalte im produzierten Biogas gegen Ende der Vergärung (Tag 30–40) gemessen (Abbildung 29).

Tabelle 69. Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im Biogas von Gärgutmischungen

| Mischvarianten | | CH ₄ -Gehalt (Vol.%) | | | H ₂ S-Gehalt (ppm) | | | NH ₃ -Gehalt (ppm) | | |
|----------------|----------------|---------------------------------|----|-------|-------------------------------|---|-------|-------------------------------|---|-------|
| Maissilage | Kleegrassilage | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW |
| 10 % | 90 % | 57,8 | 12 | 16,8 | 1591 | 8 | 809 | 104,0 | 4 | 36,4 |
| 20 % | 80 % | 59,7 | 12 | 14,6 | 1573 | 8 | 1123 | 103,0 | 4 | 37,3 |
| 30 % | 70 % | 61,8 | 12 | 10,1 | 907 | 8 | 606 | 79,4 | 4 | 38,7 |
| 40 % | 60 % | 63,7 | 12 | 9,0 | 955 | 8 | 640 | 92,5 | 4 | 28,7 |
| 50 % | 50 % | 60,7 | 11 | 8,3 | 853 | 8 | 555 | 106,0 | 4 | 28,8 |
| 60 % | 40 % | 61,5 | 11 | 10,3 | 875 | 8 | 527 | 93,8 | 4 | 39,4 |
| 70 % | 30 % | 61,4 | 11 | 10,7 | 845 | 8 | 493 | 89,3 | 4 | 33,5 |
| 80 % | 20 % | 61,8 | 11 | 10,7 | 723 | 8 | 581 | 93,8 | 4 | 25,6 |
| 90 % | 10 % | 61,0 | 11 | 10,6 | 336 | 8 | 163 | 84,5 | 4 | 20,9 |
| 100 % | – | 63,0 | 10 | 8,9 | 323 | 8 | 139 | 90,0 | 4 | 17,8 |
| – | 100 % | 60,2 | 10 | 16,4 | 1510 | 8 | 1279 | 125,0 | 4 | 12,9 |

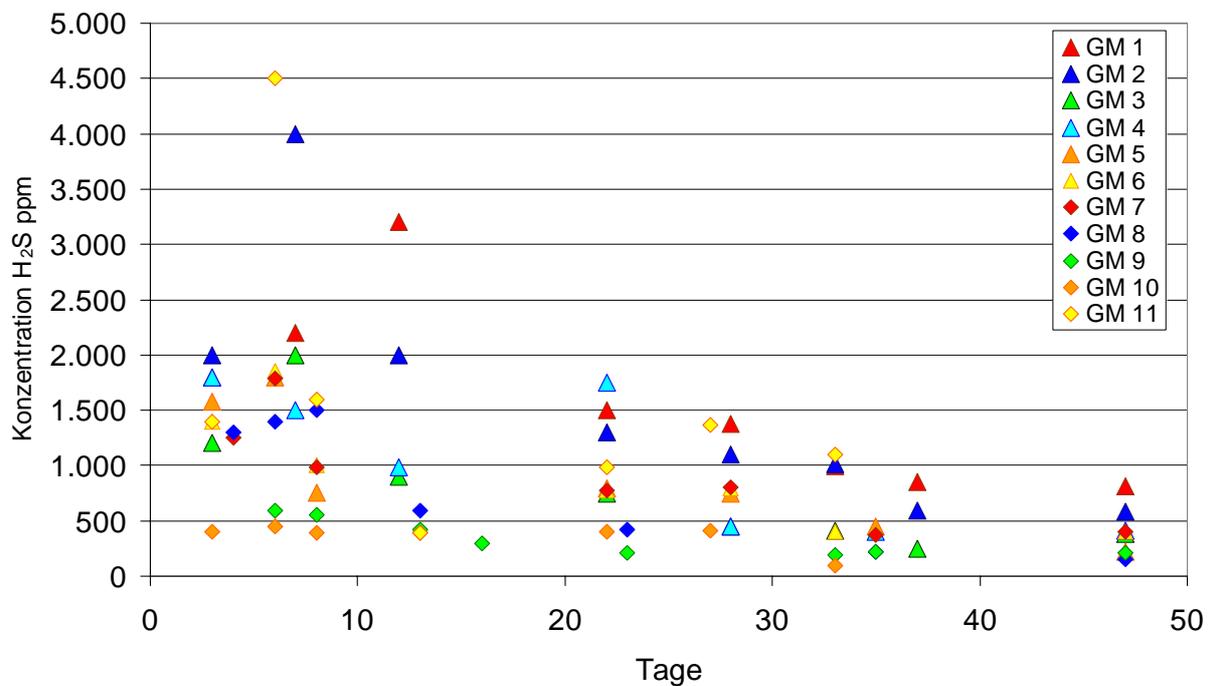


Abbildung 28. Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas von Gärgutmischungen im Verlauf der Vergärung

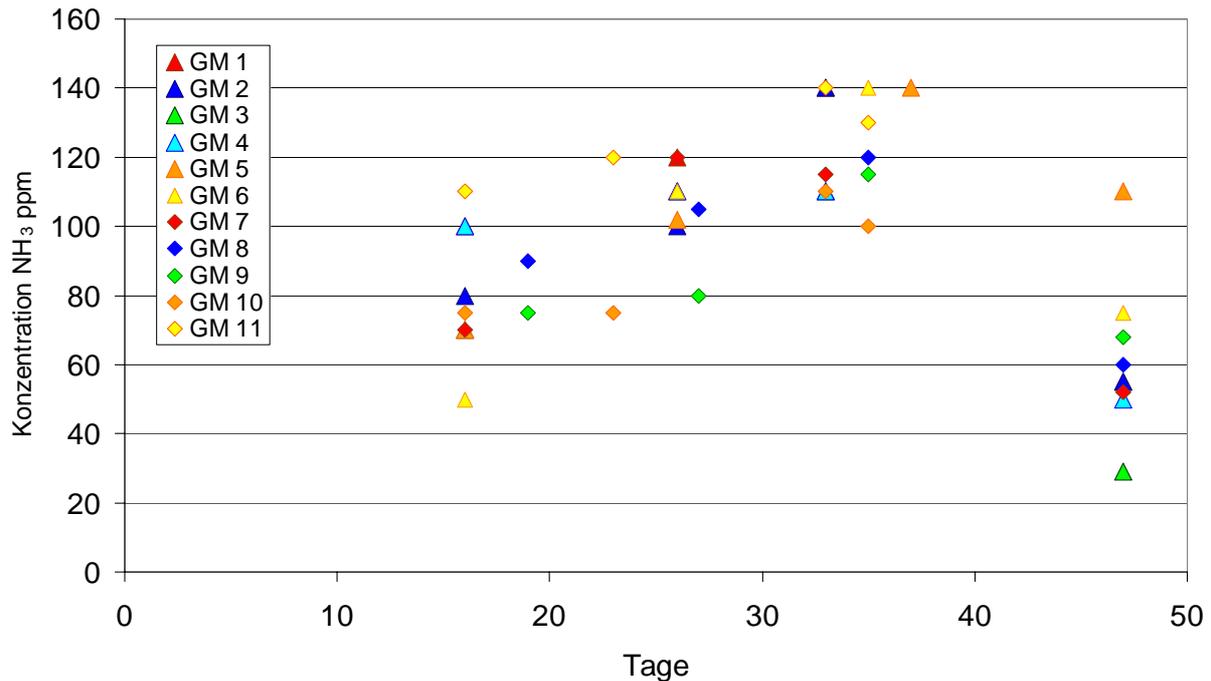


Abbildung 29. Ammoniakgehalt im Biogas von Gärgutmischungen im Verlauf der Vergärung

Einfluss einer Zulage an Tonmineralen

Der Einfluss einer Zulage an Tonmineralen wurde mit Hilfe des Zusatzstoffes IPUS meth-max[®] (vormals IPUS-zeo-lift-biokat), einem auf nanoporösem Alumosilikat-Mineralien basierendem Biokatalysator, untersucht. IPUS meth-max[®] besitzt eine große innere Oberfläche und ist damit in der Lage, reversible Stoffe wie Ammonium zu binden. Vier verschiedene Energiepflanzen (Triticale, Weizen, Wiesengras und Sonnenblumen) wurden jeweils 5 % IPUS meth-max[®] zugesetzt und vergärt. Es zeigte sich (Tabelle 70), dass die Zulage von 5 % IPUS meth-max[®] bei allen vier Energiepflanzen zu einer Erhöhung des spezifischen Methanertrags führte.

Tabelle 70. Spezifischer Methanertrag von Energiepflanzen mit und ohne Zugabe eines Biokatalysators

| Variante | | Methanertrag (NI (kg oTS) ⁻¹) | | |
|----------------|----------------------------|---|---|-------|
| Energiepflanze | IPUS meth-max [®] | Mittelwert | n | STABW |
| Triticale | Nein | 269 | 5 | 16,3 |
| | Ja | 302 | 5 | 6,5 |
| Weizen | Nein | 338 | 3 | 28,8 |
| | Ja | 414 | 3 | 19,3 |
| Wiesengras | Nein | 297 | 3 | 14,4 |
| | Ja | 344 | 3 | 8,6 |
| Sonnenblumen | Nein | 243 | 3 | 10,4 |
| | Ja | 298 | 3 | 9,2 |

Der spezifische Methanertrag von Triticale erhöhte sich um 12 %, für Weizen um 22 %, für Wiesengras um 16 % und für Sonnenblumen um 23 %.

Auf den Gehalt an Methan und Schwefelwasserstoff im produzierten Biogas zeigte die Zulage an IPUS meth-max[®] keine einheitliche Wirkung (Tabelle 71). Bei der Vergärung von Triticale

und Wiesengras wurde durch die Zulage an IPUS meth-max[®] der Gehalt an Methan gesenkt. Für Weizen und Sonnenblumen zeigte sich eine steigernde Wirkung von IPUS meth-max[®] in Bezug auf den Methangehalt. In Wiesengras wurde der Schwefelwasserstoffgehalt durch die Zulage an IPUS meth-max[®] erhöht, in Kombination mit allen anderen Energiepflanzen kam es zu einer Absenkung des Schwefelwasserstoffgehalts. Dagegen bewirkte IPUS meth-max[®] in allen Energiepflanzen eine Reduktion des Ammoniakgehalts im Biogas. Ein Beweis dafür, dass die nanoporösen Alumosilikate-Mineralien von IPUS meth-max[®] in der Lage waren, Ammonium an ihrer Oberfläche zu binden. In Kombination mit Triticale wurde der Ammoniakgehalt im gebildeten Biogas um 54 % gesenkt, beim Weizen um 50 %, beim Wiesengras um 40 % und bei den Sonnenblumen sogar um 72 %. Diese einheitliche Wirkung auf den Ammoniakgehalt im Biogas kann auch die positive Wirkung einer Zulage von IPUS meth-max[®] auf den spezifischen Methanertrag der Energiepflanzen erklären, erhöhte Ammoniakkonzentrationen hemmen die Mikroorganismen und damit die anaeroben Abbauprozesse im Biogasfermenter.

Tabelle 71. Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im Biogas von Energiepflanzen mit und ohne Zugabe eines Biokatalysators

| Variante | | CH ₄ -Gehalt (Vol.%) | | | H ₂ S-Gehalt (ppm) | | | NH ₃ -Gehalt (ppm) | | |
|----------------|----------------------------|---------------------------------|----|-------|-------------------------------|---|-------|-------------------------------|---|-------|
| Energiepflanze | IPUS meth-max [®] | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW | Mittelwert | n | STABW |
| Triticale | Nein | 57,1 | 6 | 5,8 | 320 | 5 | 28 | 12,5 | 3 | 3,5 |
| | Ja | 54,1 | 6 | 8,4 | 90 | 5 | 17 | 5,8 | 3 | 3,8 |
| Weizen | Nein | 53,2 | 6 | 5,2 | 427 | 5 | 53 | 14,9 | 3 | 9,5 |
| | Ja | 63,3 | 6 | 4,9 | 109 | 5 | 20 | 7,5 | 3 | 4,8 |
| Wiesengras | Nein | 53,6 | 12 | 9,8 | 475 | 5 | 131 | 11,9 | 3 | 3,1 |
| | Ja | 50,2 | 10 | 11,0 | 600 | 6 | 91 | 7,1 | 3 | 4,0 |
| Sonnenblumen | Nein | 55,4 | 12 | 9,9 | 725 | 5 | 82 | 16,0 | 3 | 5,7 |
| | Ja | 65,0 | 5 | 3,9 | 195 | 3 | 91 | 4,5 | 3 | 3,5 |

5.6 Leitfäden für eine optimierte Biogaserzeugung aus Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 2.3)

Anbau von Energiepflanzen

Grundsätzlich können für den Energiepflanzenanbau alle auf dem Markt erhältlichen Kulturpflanzensorten verwendet werden (KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Die Kulturarten, die derzeit zunehmend zur Biogaserzeugung genutzt werden, wurden bislang vorwiegend für die menschliche Ernährung und die Tierernährung gezüchtet. Die Biogaserzeugung stellt aber andere Anforderungen an Qualität und Zusammensetzung der Pflanzen. Um eine optimale Biogas- bzw. Methanproduktion zu erreichen, müssen diejenigen Genotypen von Kulturpflanzenarten gefunden werden, die einen hohen Methanhektarertrag erbringen.

Bei der Sortenwahl sollte generell auf eine hohe Standfestigkeit und Krankheitsresistenz geachtet werden, da hiermit die besten Voraussetzungen für eine gesunde Entwicklung der Pflanzen geschaffen werden und der Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln und anderen Mitteln (z.B. Halmstabilisatoren im Getreide) entbehrlich wird. Bei Getreidearten sind gut bestockende Sorten zu bevorzugen, denn sie unterdrücken nicht nur die Unkräuter effektiver,

eine hohe Bestandsdichte beeinflusst auch den Biomasseertrag positiv. VON BUTTLAR (1996) und KARPENSTEIN-MACHAN ET AL. (1997) konnten in Feldversuchen mit Wintergerste, Winterroggen, Wintertriticale und Winterhafer eine positive Beziehung zwischen Bestandsdichte und Biomasseertrag nachweisen, während die Pflanzenlänge der Sorte in keiner engen Beziehung zum Biomasseertrag stand. Extreme Längen, wie sehr lange Sorten oder sehr kurze Sorten sollten jedoch nicht gewählt werden, da einerseits die Lagergefahr steigt und andererseits der Biomasseertrag leidet.

Von den im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzen eignet sich besonders Mais durch seinen hohen Biomasseertrag je Hektar (23,0 bis 30,8 t TM ha⁻¹) als nachwachsender Rohstoff für die Verwendung in Biogasanlagen (Tabelle 72).

Tabelle 72. Biomasseerträge der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich

| | Energiepflanzen | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Mais | Getreide | Sonnenblumen | Wiesengras |
| Maximaler Biomasseertrag t TM ha ⁻¹ | 23,0–30,8 ¹ | 15,8–19,3 ² | 16,4–18,3 ³ | 4,2–11,4 ⁴ |

¹abhängig vom Erntezeitpunkt und von der Maissorte

²abhängig vom Erntezeitpunkt, vom Standort und von der Getreideart und -sorte

³abhängig vom Erntezeitpunkt und von der Sonnenblumensorte

⁴abhängig vom Erntezeitpunkt, vom Standort und von der Bewirtschaftungsintensität

Für die Entwicklung von Energiemaissorten werden zurzeit zwei unterschiedliche Strategien diskutiert bzw. verfolgt:

Strategie 1: Neue Züchtungswege

Hier wird auf der Basis bewährter Silomaislinien angestrebt, leistungsstärkere Hybriden zu entwickeln. Seit einigen Jahren verfolgen verschiedene züchterische Ansätze das Ziel, die Biomasse- und Methanertragsleistung von Mais zu steigern. Nach SCHMIDT (2005) werden dabei folgende züchterische Ansätze verfolgt:

1. Verlängerung der vegetativen Wachstumsphase durch Einkreuzung spätreifer Linien
2. Züchterische Kombination von Spätreife und Kältetoleranz
3. Integration von Kurztagsgenen aus exotischen Populationen
4. Verbesserung der Trockenstresstoleranz
5. Adaptation von Mais an eine C3/C4-Energiepflanzenfruchtfolge
6. Adaptation von Energiemais an die Bedingungen des ökologischen Landbaus

Dem Ansatz 1 liegt die Hypothese zu Grunde, dass spätreife Energiemaissorten später in die generative Phase eintreten als konventionelle Futtermaissorten. Dadurch bleibt den Pflanzen mehr Zeit, ihre Assimilationsleistung in die Bildung vegetativer Blattbiomasse (Photosyntheseflächen) zu investieren und weniger in die Stärkebildung im Kolben.

Strategie 2: Der herkömmliche Züchtungsweg

Die konventionelle Züchtungsstrategie geht davon aus, dass aus klimatischen Gründen (Spätfröste im Frühjahr, Fröste im Frühherbst, Photosyntheseperiode, Tagesdurchschnittstempera-

tur) das Reifespektrum für die Silomaisnutzung bereits weitgehend ausgeschöpft wird (DEGENHARDT 2005). Die Nutzung geringfügig späterer Sorten erscheint möglich. Diese Züchtungsstrategie zielt auch darauf ab, dass neben hohen Biomasseerträgen auch das Spektrum der Inhaltsstoffe für die Methangärung angepasst wird. Das heißt, dass durch züchterische Methoden vor allem die derzeit im Minimum vorhandenen Inhaltsstoffe wie Proteine und Fette angehoben werden und damit die Biogasausbeute verbessert werden könnte.

Zum Anbau sollten Maissorten kommen, die nur geringfügig später abreifen als die ortsüblich für die Futtergewinnung angebauten Sorten. Sehr spätreife Sorten würden das Anbaurisiko erhöhen, ohne signifikante Vorteile für den Methanhektarertrag zu bringen.

Es stellt sich also derzeit die Frage, mit welcher der beiden angeführten Strategien der Züchtungserfolg am größten ist und adaptierte Energiemaissorten am effektivsten entwickelt werden können. Angestrebt werden Ziele, die auch eine Gültigkeit für alle anderen Energiepflanzen besitzen:

- eine hohe Ertragsfähigkeit und ein hohes Biomassebildungsvermögen
- eine optimale Qualität für die anaerobe Vergärung
- eine optimale Silierfähigkeit
- möglichst hohe Methanhektarerträge bei gleichzeitig möglichst hoher Ertragssicherheit
- die Vermeidung von Bodenverdichtungen durch die Ernte und Pflugfurche des Bodens im Herbst

Maispflanzen benötigen in der exponentiellen Wachstumsphase vor allem Wasser, damit sie ihr genetisches Potenzial auch tatsächlich in Ertrag umsetzen können. Der spätere Eintritt von der vegetativen in die generative Wachstumsphase darf nicht dazu führen, dass die Pflanzen im Herbst nicht mehr zur Erntereife ausreifen können. Sie müssen mindestens einen Trockensubstanzgehalt von 28 % erreichen. Eine gute Silierfähigkeit (Milchsäuregärung) ohne Sickersaftbildung (Geruchsbelästigung) wird angestrebt. Das spezifische Methanbildungsvermögen der Biomasse soll möglichst hoch sein, um maximale Methanmengen pro Hektar zu erreichen.

Bei der Nutzenanwendung von Mais als Energiemais lassen sich drei Nutzungsformen unterscheiden, die ähnlich auch für die anderen Energiepflanzen gelten:

1. Energiemais wird als einzige Hauptkultur im Vegetationsjahr angebaut und genutzt.
2. Energiemais wird als Hauptkultur nach einer Vorfrucht wie z.B. Winterroggen angebaut.
3. Energiemais wird in Kombination mit anderen Kulturpflanzenarten wie z.B. Sonnenblumen angebaut. Ziel des kombinierten Anbaus ist es, die Silierfähigkeit durch die gemeinsame Ernte beider Kulturpflanzenarten zu verbessern und gleichzeitig das Nährstoffmuster komplementär zu ergänzen und damit insgesamt höhere spezifische Methanerträge und Methanhektarerträge zu erreichen.

Die Zuchtziele und Eigenschaften von Energiemais sollen der Nutzung angepasst sein. Darüber hinaus spielt bei der Sortenwahl auch der jeweilige Standort eine maßgebliche Rolle.

Wie die vorliegenden Untersuchungen zum Energiemaisanbau zeigten, waren angepasste Zuchtstrategien für spezialisierten Energiemais, die auf der Verwendung eher spätreifer Futtermassensorten basieren, relativ erfolgreich. Konventionelle Sorten mit leicht erhöhtem Reifegrad

zeigten bislang die höchsten Methanhektarerträge bei gleichzeitig guter Silierfähigkeit der Biomasse und hoher Ertragssicherheit. Die Sorteneigenschaften des anzubauenden Energiemaises richten sich vor allem danach, welche der drei oben dargelegten Nutzungsalternativen angestrebt wird und nach der Ertragskraft des jeweiligen Standortes.

Im Energiepflanzenanbau gilt auch, dass einseitige Fruchtfolgen vermieden werden müssen. Das bedeutet, dass ein möglichst breites Spektrum an Pflanzenarten für die Biogaserzeugung genutzt werden sollte. Aus diesem Grund wurden und werden am Institut für Landtechnik (ILT) im Department für Nachhaltige Agrarsysteme der Universität für Bodenkultur Wien umfangreiche Forschungsarbeiten durchgeführt. Sie gehen der Frage nach, wie Kulturpflanzen aus ökologisch optimierten Fruchtfolgesystemen am besten als Energiepflanzen für die Biogaserzeugung eingesetzt werden können. Alle Anbauformen der Vor-, Haupt-, Zwischen- und Nachfruchtnutzung spielen dabei eine Rolle.

Für alle Energiepflanzen wird angestrebt, hohe Biomasseerträge in standortangepassten, vielfältigen und gesunden Fruchtfolgesystemen, mit weitgehend geschlossenem Nährstoffkreislauf zu erreichen. Integrierende Fruchtfolgesysteme ermöglichen zukünftig die Erzeugung von Biomasse zur menschlichen und tierischen Ernährung und zur Rohstoff- und Energiegewinnung. Mit solchen Strategien kann die höchste Produktion an Lebensmittel, Stoff und Energie pro Flächeneinheit erreicht werden.

Ernte und Konservierung von Energiepflanzen

Da die meisten Energiepflanzen (z.B. Getreide, Sonnenblumen, Mais) in unseren Breitengraden nur einmal jährlich geerntet werden, d.h. saisonal anfallen, ist eine Silierung sinnvoll, um über das gesamte Jahr hinweg eine möglichst gleich bleibende Qualität der Gärrohstoffe für die Biogaserzeugung zu haben. Energiepflanzen sollten daher ihren maximalen Methanhektarertrag erreicht haben, wenn sie optimal silierfähig sind, d.h. einen Trockenmassegehalt von ca. 30 % besitzen. Dies gilt dann auch als der optimale Erntetermin für Energiepflanzen.

Abbildung 30 stellt den Trockenmassegehalt von Mais dem Methanhektarertrag gegenüber. Es zeigte sich, dass im Mittel aller Versuche im Bereich eines Trockenmassegehalts von 33 % das Maximum im Methanhektarertrag erreicht wurde. Das bedeutet, dass die beiden Kriterien (a) hohes Methanbildungsvermögen pro Hektar und (b) optimale Silierfähigkeit der Pflanzenbiomasse für den Energiemais gut in Übereinstimmung gebracht werden können. Von zentraler Bedeutung für alle Energiepflanzen wird es zukünftig sein, solche Hybriden der Kulturarten zu finden, die bei ca. 30–33 % Trockenmassegehalt in der Ganzpflanze ihr maximales Methanbildungsvermögen haben.

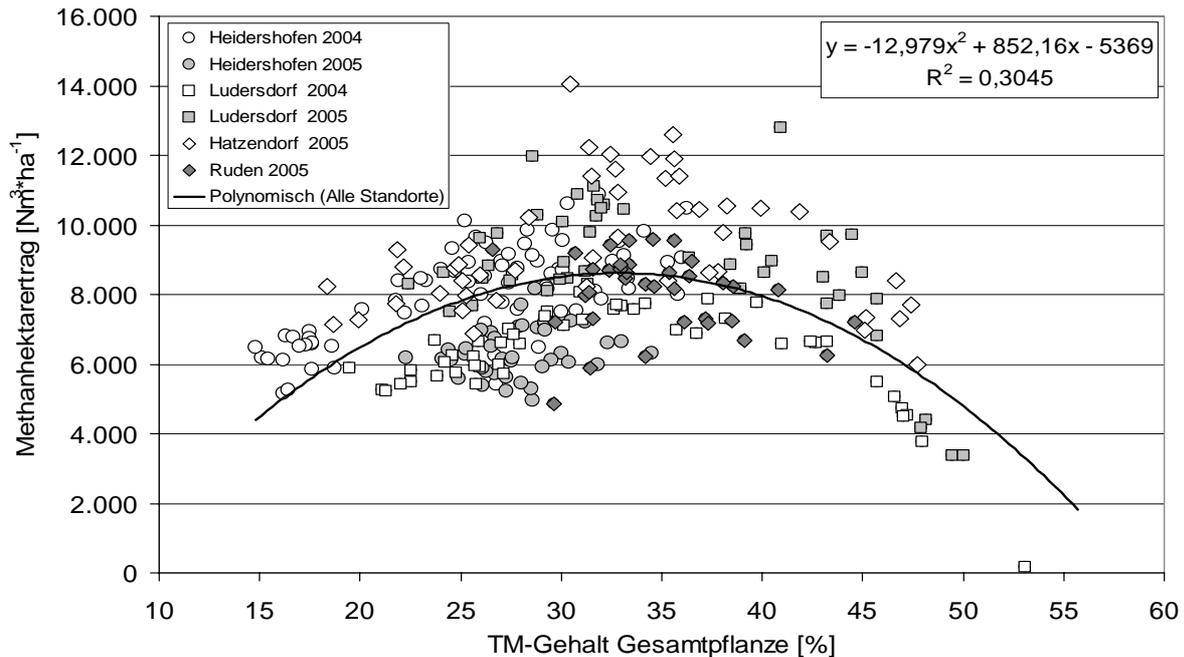


Abbildung 30: Methanhektarertrag von Mais in Abhängigkeit zum Trockenmassegehalt der Gesamtpflanze

Maissilage kann unproblematisch gelagert werden, da sie in der Regel als Fahrsilo angelegt und mit einer Plastikfolie abgedeckt wird. Nach Abschluss der Silierphase (4–6 Wochen) kann sie direkt in der Biogasanlage eingebracht werden.

Der Anbau und die Ernte von Gras bzw. die Nutzung von Grassilage ist wie auch beim Mais gut mechanisierbar und relativ unproblematisch. Je nach Witterung und Klimabedingungen kann im Durchschnitt mit drei bis fünf Ernten pro Jahr gerechnet werden. Die Menge an Grassilage, die letztlich für eine Verwertung in Biogasanlagen zur Verfügung steht, hängt von mehreren Faktoren ab. Dies sind im Wesentlichen:

- Bodenqualität
- Klimabedingungen
- Pflanzenart und -sorte
- Reifegrad zum Erntezeitpunkt
- Art der Konservierung und Lagerung

Aufgrund der Vielfalt dieser Faktoren ist eine verlässliche Angabe von Ernteerträgen für Wiesengras schwer möglich.

Nährstoffzusammensetzung der Energiepflanzen und Nährstoffversorgung der Mikroorganismen sowie spezifische Methanausbeute und Methanhektarertrag von Energiepflanzen

Die Inhaltsstoffzusammensetzung von Energiepflanzen beeinflusst die spezifische Methanausbeute. Den reinen verdaulichen Inhaltsstoffen, Rohprotein, Rohfett und Kohlenhydrate, kann eine spezifische Biogas- und Methanbildungsrate sowie ein Methangehalt zugeordnet werden (Tabelle 73). Rohfette weisen eine deutlich höhere Biogas- und Methanbildungsrate auf als Rohproteine und Kohlenhydrate.

Tabelle 73. Biogas- und Methanbildungsrate sowie Methangehalt verdaulicher Inhaltsstoffe von Futtermitteln (nach KARPENSTEIN-MACHAN 2005)

| Verdauliche Inhaltsstoffe | Biogasbildungsrate l (kg oTS) ⁻¹ | Methanbildungsrate l (kg oTS) ⁻¹ | Methangehalt Vol. % |
|--|--|--|------------------------|
| Rohprotein | 700 | 490 | 71 |
| Rohfett | 1250 | 850 | 68 |
| Kohlenhydrate (Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) | 790 | 395 | 50 |

Die bedeutendste Stoffgruppe in allen Kulturpflanzen und somit auch in den Energiepflanzen sind jedoch die Kohlenhydrate. Im Durchschnitt liegt der Gehalt an Kohlenhydraten (Cellulose, Hemicellulose, Pektin, Stärke, Zucker) in den Pflanzen bei 75 bis 80 %, der Gehalt an Rohproteinen bei 18 bis 20 % und der Gehalt an Rohfett bei 2 bis 5 %. In Ölpflanzen wie der Sonnenblume lagern sich im Korn im Verlauf der Vegetation hohe Ölgehalte ein. Das bedeutet, mit Ölpflanzen könnten graduell höhere spezifische Methanausbeuten realisiert werden. Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts geben dies nicht eindeutig wieder (Tabelle 74). Die Unterschiede in der spezifischen Methanausbeute zwischen den untersuchten Energiepflanzen Mais, Getreide, Sonnenblumen und Wiesengras sind nicht nur vom Rohfettgehalt bestimmt, sondern auch von Gehalt an Rohproteinen und Kohlenhydraten. Das bedeutet, die Höhe der spezifischen Methanausbeute der verschiedenen Energiepflanzen ist auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der verdaulichen Inhaltsstoffe zurück zu führen. Die Inhaltsstoffgehalte der Energiepflanzen waren hauptsächlich vom Erntezeitpunkt geprägt und weniger von der Sorte bzw. dem Standort. Im Verlauf der Vegetation erhöhte sich der Rohfettgehalt in der Biomasse der Sonnenblumen auf knapp 20 %. Die Rohfettgehalte in der Biomasse vom Mais, Wiesengras und Getreide lagen maximal bei 2, 4 bzw. 5 %. Im Verlauf der Vegetation ergaben sich die höchsten Gehalte an N-freien Extraktstoffen (bis zu 65 %) für den Mais und das Getreide. Für das Wiesengras wurde ein maximaler Gehalt an N-freien Extraktstoffen von 54 % ermittelt, für die Sonnenblumen von 45 %. Für das Getreide und das Wiesengras ergaben sich die maximal höchsten Rohfaser- und Rohproteingehalte (bis zu 40 bzw. 23 %). Die maximalen Rohfasergehalte der Sonnenblumen und des Maises lagen bei 30 %. Rohprotein wurde maximal 18 % in den Sonnenblumen gebildet und nur 8 % im Mais.

Tabelle 74. Spezifische Methanausbeute der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich

| | Energiepflanzen | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Mais | Getreide | Sonnenblumen | Wiesengras |
| Spezifische Methanausbeute NI (kg oTS) ⁻¹ | 359–422 ¹ | 232–254 ² | 190–271 ³ | 128–392 ⁴ |

¹zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig von der Maissorte

²zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig vom Standort und von der Getreideart und -sorte

³zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig von der Sonnenblumensorte

⁴abhängig vom Aufwuchs, vom Erntezeitpunkt, vom Standort und von der Bewirtschaftungsintensität

Die Nährstoffzusammensetzung der Energiepflanzen (Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freie Extraktstoffe) ist auch die Basis der Entwicklung der Schätzgleichungen im Methanenergiewertmodell (MEWM). Darüber hinaus konnte mit dem vorliegenden Projekt demonstriert

werden, dass das Eiweiß:Energie-Verhältnis der Energiepflanzen auch maßgeblich die produzierte Biogasqualität beeinflusst.

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte auch aufgezeigt werden, dass die spezifische Methanausbeute durch eine entsprechende Vorbehandlung des Gärgutes weiter erhöht werden kann. Die Zulage des Biokatalysators IPUS meth-max[®] zeigte eine stabilisierende Wirkung auf die Vergärung aller in diesem Zusammenhang untersuchten Energiepflanzen und erhöhte deren spezifische Methanausbeute um 12 % (Triticale), 16 % (Wiesengras), 22 % (Weizen) bzw. 23 % (Sonnenblumen). Im Fall von Triticale (+4 %), Wiesengras (+23 %) und Sonnenblumen (+65 %) besaß auch eine vorhergehende Dampfbehandlung eine steigernde Wirkung auf die spezifische Methanausbeute. Eine vorhergehende Behandlung mit Mikrowellen erhöhte die spezifische Methanausbeute von Wiesengras (+29 %) und Sonnenblumen (+82 %). Die spezifische Methanausbeute der Sonnenblumen konnte auch durch eine Säurebehandlung gesteigert werden (+16 %).

Aufgrund einer hohen spezifischen Methanausbeute und hoher Biomasseerträge wurden mit der Energiepflanze Mais aber die höchsten Methanhektarerträge erzielt (Tabelle 75). Mit Sonnenblumen wurden rund 30 % des Methanhektarertrages von Mais erreicht und mit intensiv bewirtschaftetem Wiesengras (3 bis 4 Schnitte pro Jahr) und Getreide im Durchschnitt 26,5 %. Mit extensiv bewirtschaftetem Wiesengras (1 bis 2 Schnitte pro Jahr) wurden weniger als 10 % (knapp 8 %) des Methanhektarertrages von Mais erzielt.

Tabelle 75. Methanhektarerträge der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich

| | Energiepflanzen | | | |
|--|--------------------------|------------------------|------------------------|---|
| | Mais | Getreide | Sonnenblumen | Wiesengras |
| Methanhektarertrag Nm ³ ha ⁻¹ | 8974–12.657 ¹ | 3094–3305 ² | 2354–3818 ³ | 1 bis 2 Schnitte pro Jahr: 649–978 3 bis 4 Schnitte pro Jahr: 2.746–3.459 ⁴ |

¹zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig von der Maissorte

²zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig vom Standort und von der Getreideart und -sorte

³zum optimalen Erntezeitpunkt; abhängig von der Sonnenblumensorte

⁴abhängig vom Erntezeitpunkt

Generelle Einflussfaktoren auf den Methanhektarertrag von Energiepflanzen sind:

- Biomasseertrag pro Hektar
- Düngung
- Niederschlag bzw. Bewässerung
- Temperaturverlauf während der Vegetationsphase
- Alter und Reifegrad der Pflanze
- Erntezeitpunkt
- Qualität des Häckselgutes
- Konservierungsform des Erntegutes
- Vorbehandlung des Gärgutes

- Zusammensetzung der organischen Substanz
- Abbaugrad der organischen Substanz
- Verweildauer im Fermenter
- Spezifische Methanausbeute

Optimale hydraulische Verweilzeiten und Vorbehandlungen von Energiepflanzen

Die im vorliegenden Projekt ermittelten optimalen hydraulischen Verweilzeiten lagen zwischen 20 Tagen (Getreideganzpflanzensilagen) und 42 Tagen (Sonnenblumensilagen). Es zeigte sich ein Einfluss der Energiepflanzenart, aber auch des Erntejahres auf die optimale hydraulische Verweilzeit. Keinen Einfluss scheint es zu haben, ob frische oder silierte Biomasse vergärt wird. Eine vorhergehende Wärmebehandlung der Energiepflanzen und die Zugabe des Biokatalysators IPUS meth-max[®] erhöhten die optimale hydraulische Verweilzeit.

Einige dieser Ergebnisse, speziell der Einfluss der Vorbehandlungen, scheinen nicht erklärbar und gegenläufig zu dem, was erwartet wurde. Die optimale hydraulische Verweilzeit ist aber auch abhängig von der Raumbelastung im Fermenter. Die im vorliegenden Projekt für die unterschiedlichen Energiepflanzen gefundenen optimalen hydraulischen Verweilzeiten müssen daher als erste Anhaltspunkte angesehen werden, da sie in einem statischen System (Batchfermenter) ermittelt wurden. In weiterführenden Untersuchungen mit dynamischen Systemen (Durchflusssystemen) müssen diese Ergebnisse daher noch verifiziert werden.

Potenziale des Energiepflanzenanbaus – aktueller Stand

Energiemenge aus der Biogaserzeugung

In der Landwirtschaft ist derzeit die Entwicklung nachhaltiger Fruchtfolgesysteme ein Schwerpunkt. Sie fußt auf drei wichtigen Säulen („Drei-Säulen-Modell“):

- die Versorgung mit Nahrungs- und Futtermitteln
- die Erzeugung von Stoffen (organische Dünger, Rohstoffe (u.a. Öle, Fette)) und Energie (Biogas, Biodiesel, Bioethanol)
- die Erhaltung, Förderung und Nutzung abwechslungsreicher Kulturlandschaften.

Angestrebt werden hohe Biomasseerträge in standortangepassten, vielfältigen und gesunden Fruchtfolgesystemen, deren Nährstoffkreislauf weitgehend geschlossen ist. Integrierende Fruchtfolgesysteme ermöglichen die bedarfsdeckende Erzeugung von Biomasse zur menschlichen und tierischen Ernährung sowie zur Rohstoff- und Energiegewinnung.

Tabelle 76 zeigt wichtige Kennzahlen der Leistungsfähigkeit so genannter „spezialisierter“ und „integrierter Biogaserzeugungssysteme“. Das „spezialisierte“ Erzeugungssystem ist dadurch charakterisiert, dass Teile der Ackerflächen (20 %) ausschließlich für die Biogaserzeugung genutzt werden. In diesen Systemen ist ein durchschnittlicher Methanhektarertrag von 6500 m³ ha⁻¹ erreichbar. Grünlandflächen, sowie Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung werden im spezialisierten System zumeist nicht berücksichtigt. Im „integrierten System“ dienen Fruchtfolgesysteme gleichermaßen der bedarfsdeckenden Nahrungs- und Futtermittelerzeugung, sowie der Erzeugung von Stoffen und Energie. Darüber hinaus werden nutzbare Stoffströme zur Biogaserzeugung eingesetzt. In einem solchen System können insgesamt 3500 m³ Methan pro

ha Ackerfläche erzeugt werden. Neben den Ackerflächen werden im integrierten System auch Teile von Grünlandflächen, sowie der Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung als Rohstoffe für die Biogaserzeugung eingesetzt. Dieses Biogasnutzungssystem trägt zudem aktiv zur Erhaltung, Förderung und Nutzung vielfältiger Kulturlandschaften bei.

Tabelle 76. Energiekennzahlen der Biogaserzeugung in spezialisierten und integrierten Erzeugungssystemen

| | Einheit | Biogaserzeugungssysteme | |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------|
| | | Spezialisiert | Integriert |
| Ackerfläche | ha | 1.375.822 | 1.375.822 |
| davon 20 % | ha | 275.164 | – |
| Methanhektarertrag | m ³ ha ⁻¹ | 6.500 | 3.500 |
| Energie Ackerfläche | t ROE a⁻¹ | 1.537.892 | 4.140.478 |
| Grünlandfläche | ha | | 1.810.387 |
| Wirtschaftsgrünland | ha | | 909.407 |
| davon 20 % | ha | | 181.881 |
| extensives Grünland | ha | | 900.980 |
| davon 60 % | ha | | 540.588 |
| Methanhektarertrag | m ³ ha ⁻¹ | | 3.000 |
| Energie Grünlandfläche | t ROE a⁻¹ | | 469.169 |
| Tierhaltung | | | |
| Rinder | Stück | | 2.050.991 |
| Schweine | Stück | | 3.125.361 |
| Energie Tierhaltung | t ROE a⁻¹ | | 173.276 |
| Energie insgesamt | t ROE a⁻¹ | 1.537.892 | 4.782.924 |

ROE = Rohöleinheiten

Wie die Tabelle 76 aufzeigt, kann die österreichische Landwirtschaft mit spezialisierten Biogaserzeugungssystemen eine jährliche Energiemenge von rund 1,5 Mio. t ROE von der Ackerfläche erzeugen. In integrierten Biogaserzeugungssystemen, bei denen unterstellt wird, dass alle Ackerflächen im Sinne des „Drei-Säulen-Modells“ genutzt werden, kann verschiedenste Biomasse der Ackerfläche (z.B. Vorfrüchte, Nebenfrüchte, Hauptfrüchte oder Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung wie z.B. Zuckerrübenschritte) als Rohstoff für die Biogaserzeugung genutzt wird. Die jährliche Energiemenge, die von der Ackerfläche erzeugt werden kann, würde sich damit auf 4,1 Mio. t ROE erhöhen lassen. Unterstellt man weiterhin, dass in den integrierten Biogaserzeugungssystemen Wirtschaftsgrünland zu 20 % und extensives Grünland zu 60 % für die Biogaserzeugung genutzt wird und auch die Wirtschaftsdünger von Rindern und Schweinen zur Biogaserzeugung eingesetzt werden, dann ergibt sich eine Gesamtenergiemenge von 4,8 Mio. t ROE pro Jahr.

Investitionen und CO₂-Einsparung durch die Errichtung von Biogasanlagen

1,5 Mio. t ROE entsprechen 17.886 Mio. kWh bzw. 1556 Mio. m³ CH₄ und 4,8 Mio. t ROE entsprechen 55.625 Mio. kWh bzw. 4839 Mio. m³ CH₄ (Tabelle 77). Im Szenario Spezialisierte Biogaserzeugungssysteme ergibt sich damit bei 8.000 Betriebsstunden pro Jahr ein real umsetzbares Leistungspotenzial von 2236 MW und für das Szenario integrierte Biogaserzeugungssysteme ein Leistungspotenzial von 6953 MW. Unterstellt man eine durchschnittliche Investition von 1,2 k€ bei 1 MW installierter Gesamtleistung für eine Anlage (Walla & Schneeberger 2003), dann ergibt sich ein Investitionsvolumen von 2,7 bzw. 8,3 Mrd. € für das spezialisierte bzw. integrierte System. Unterstellt man einen 20-jährigen Umsetzungszeitraum, beliefe sich das jährliche Investitionsvolumen in den ländlichen Regionen Österreichs auf 134 bzw. 417 Mio. €.

Tabelle 77. Volkswirtschaftliche Kennzahlen in spezialisierten und integrierten Biogaserzeugungssystemen

| | Einheit | Biogaserzeugungssysteme | |
|--|---|-------------------------|------------|
| | | Spezialisiert | Integriert |
| Energie insgesamt¹ | t ROE a ⁻¹ | 1.537.892 | 4.782.924 |
| | Mio. kWh a ⁻¹ | 17.885,7 | 55.625,4 |
| | Mio. m ³ CH ₄ a ⁻¹ | 1.556,1 | 4.839,4 |
| Leistungspotenzial² | MW | 2.236 | 6.953 |
| Gesamtinvestition³ | Mio. € a ⁻¹ | 134 | 417 |
| CO₂-Einsparung⁴ | Mio. t CO ₂ a ⁻¹ | 5,2 | 16,1 |
| Kosten der CO₂-Einsparung | € (t CO ₂) ⁻¹ | 25,9 | 25,9 |

¹ 1 kg ROE (Rohöleinheiten) = 11,63 kWh; 1 kWh = 0,087 m³ CH₄

² bei 8000 Betriebsstunden pro Jahr

³ Kosten der Biogasanlage: 1,2 k€ bei 1 MW Gesamtleistung nach Walla & Schneeberger 2003; Umsetzungszeitraum 20 Jahre

⁴ bei Substitution von Treibstoff im Verkehrssektor; Emissionsfaktor 0,29 kg CO₂ kWh⁻¹

Die in den beiden Systemen erzeugbaren Energiemengen (17.886 Mio. kWh aus spezialisierten bzw. 55.625 Mio. kWh aus integrierten Systemen) können fossile Energieträger (z.B. im Verkehrssektor) ersetzen. Unterstellt man einen Emissionsfaktor von 0,29 kg CO₂ kWh⁻¹, ergibt sich eine jährliche CO₂-Einsparungsmenge von 5,2 bzw. 16,1 Mio. t. Im Vergleich dazu liegt der jährliche CO₂-Ausstoß des gesamten Verkehrssektors bei 22,7 Mio. t. Wenn Biogas die fossilen Treibstoffe im Verkehrssektor ersetzen würden, haben integrierte Biogaserzeugungssysteme das Potenzial, den derzeitigen CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors um rund 71 % zu reduzieren.

Der gesamte Erdgasverbrauch in Österreich beläuft sich derzeit auf rund 8,6 Mrd. m³ CH₄. Stellt man dazu die erzeugbare Methanmenge aus den integrierten Biogaserzeugungssystemen von 4,8 Mrd. m³ CH₄ in Relation, wird deutlich, dass die Biogaserzeugung das Potenzial besitzt, den Erdgasverbrauch Österreichs um rund 56 % zu reduzieren.

Bezieht man die jährlich erforderlichen Investitionen für die Errichtung von Biogasanlagen auf die dadurch mögliche CO₂-Einsparung, ergeben sich spezifische Investitionskosten pro t eingespartem CO₂ in Höhe von ca. 26 €. Im CO₂-Emissionshandel im Zuge des Kyoto Protokolls lagen die Kosten pro t CO₂ im Sommer 2005 bei 14–18 €, stiegen aber Anfang 2006 bedingt

durch jüngste Turbulenzen an den Gasmärkten sowie deN starken Frost auf 28 € (t CO₂)⁻¹ an. Mit Anfang der 2. Handelsperiode 2008 werden aber noch wesentlich höhere Preise im CO₂-Emissionshandel erwartet (www.CO2-Handel.de, Stand 02/2006).

Beschäftigungswirkung durch den Betrieb von Biogasanlagen

Tabelle 78 zeigt eine Übersicht der Beschäftigungswirkung spezialisierter und integrierter Biogaserzeugungssysteme. Bei einem Jahresarbeitszeitbedarf von 2000 h für den Betrieb einer Biogasanlage (1 MW Gesamtleistung 1) ergibt sich für die spezialisierten und integrierten Biogaserzeugungssysteme eine Gesamtstundenanzahl von 4,47 bzw. 13,91 Mio. Arbeitsstunden pro Jahr. Das entspricht einem Arbeitsplatzäquivalent von 2677 bzw. 8327 Arbeitskräften für den Betrieb der Biogasanlagen. Für die Rohstoffherzeugung sind 884 bzw. 4705 Arbeitsplätze notwendig. Für die Düngung 283 bzw. 1506 Arbeitsplätze. Daraus ergibt sich insgesamt ein Bedarf an Arbeitsplätzen in den ländlichen Regionen Österreichs von 3844 im spezialisierten Biogaserzeugungssystem bzw. von 14.538 im integrierten System. Jede im spezialisierten Biogaserzeugungssystem beschäftigte Person würde eine jährliche CO₂-Einsparung von 1349 t ermöglichen. Im integrierten Biogaserzeugungssystem würde jede beschäftigte Person eine Einsparung von 1110 t CO₂ a⁻¹ ermöglichen. Im Vergleich dazu liegen die derzeitigen Emissionen in Österreich bei 8,6 t CO₂ pro Einwohner und Jahr.

Tabelle 78 Beschäftigungswirkung spezialisierter und integrierter Biogaserzeugungssysteme

| Arbeitsplätze | Biogaserzeugungssysteme | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------|
| | Spezialisiert | Integriert |
| Biogasanlagenbetrieb ¹ | 2677 | 8327 |
| Rohstoffherzeugung ² | 884 | 4705 |
| Düngung ³ | 283 | 1506 |
| Arbeitsplätze insgesamt | 3844 | 14.538 |

¹ 2000 h a⁻¹ bei 1 MW Gesamtleistung

² Selbstfahrer Maishäcksler 4-reihig (Transport und Schnellentleerung 65 dt pro Wagen) 1,4 Akh Häckseln + 3,6 Akh Transport und Einsilieren pro ha; Flächenbedarf spezialisiert 132 ha; integriert 226 ha

³ Gülle-Feldentfernung 2 km, Fassungsvermögen 7 m³ = 1,6 Akh pro ha

Fazit

Durch die Biogaserzeugung kann erneuerbare Energie mit hohem ökologischem Wirkungsgrad erzeugt werden. Für die Vergärung eignet sich eine Vielzahl an Substraten: Wirtschaftsdünger, Restpflanzen, Nebenprodukte der Lebensmittel- und Rohstoffherzeugung und besonders auch die im vorliegenden Projekt untersuchten Energiepflanzen. In Hinblick auf die Energiepflanzen muss darauf geachtet werden, dass sie in standortangepassten, nachhaltigen und vielfältigen Fruchtfolgesystemen erzeugt werden.

In Praxisbiogasanlagen sollten wichtige Gärparameter durch regelmäßige Messungen bekannt sein: pH-Wert, Ammonium-N, organischer N, flüchtige Fettsäuren, Eiweiß-Kohlenhydrat-Fett-Verhältnis, Raumbelastung etc. Mit Hilfe dieser Informationen über die Biogasanlagen, können dann auch leistungssteigernde Zusätze oder andere Vorbehandlungsmaßnahmen gezielt und effizient eingesetzt werden.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts zeigen auf, dass weitergehende Untersuchungen mit dynamischen Laborsystemen notwendig sind, um nachfolgende Einflussfaktoren noch genauer

abklären zu können: (a) unterschiedliche Erntejahre der Energiepflanzen, (b) Vorbehandlungen und (c) Fermenterraumbelastung.

Die Biogaspotenziale von Energiepflanzen sind größer als bislang angenommen, da sich neue Möglichkeiten der Biomasseerzeugung in vielfältigen Fruchtfolgesystemen und der Cofermentation mit Wirtschaftsdüngern und hochwertigen organischen Stoffen aus den der Landwirtschaft vor- und nachgelagerten Bereichen bieten. Zu welchem Anteil und in welchem Zeitraum diese Potenziale tatsächlich in die Praxis umgesetzt werden können, hängt aber auch wesentlich von den herrschenden politischen Rahmenbedingungen ab.

5.7 Leitfäden für eine effiziente Düngung mit dem Gärrückstand vergorener Energiepflanzen (Arbeitsschwerpunkt 2.4)

Die Erzeugung von Biogas aus der Vergärung von Wirtschaftsdüngern und organischen Co-substraten (u.a. Energiepflanzen) verzeichnete in den letzten Jahren einen starken Zuwachs in der österreichischen Landwirtschaft. Neben der Produktion von Biogas, das im angeschlossenen Blockheizkraftwerk zu Wärme und elektrischer Energie umgesetzt wird, entsteht im Rahmen des Gärprozesses auch ein zusätzliches, stoffliches Fermentationsendprodukt. Dieses als Biogasgülle respektive Gärrückstand bezeichnete Substrat wird, ähnlich den flüssigen Wirtschaftsdüngerformen Gülle bzw. Jauche, auf landwirtschaftlichen Nutzflächen primär zur Nährstoffversorgung unterschiedlicher Kulturpflanzen eingesetzt. Die Einstufung des Fermentationsendprodukts als Biogasgülle oder Gärrückstand richtet sich nach der Art und Herkunft der in der Biogasanlage eingesetzten Substrate (BMLFUW, 2001).

Nicht zuletzt aufgrund der noch relativ jungen und sich zurzeit stark entwickelnden Energiegewinnungsform Biogas erscheinen die Begriffe Biogasgülle und Gärrückstände in den meisten einschlägigen Gesetzen, Richtlinien und Normen zur Düngung derzeit nicht oder nur in sehr eingeschränkter Form. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass bei der Verwendung von Fermentationsrückständen zur Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturenpflanzen die dafür relevanten Bestimmungen Geltung besitzen und einzuhalten sind.

Daraus ergeben sich allerdings eine Reihe von offenen Fragen in Bezug auf die Fermentationsendprodukte, deren Beantwortung hinsichtlich eines sach- und umweltgerechten Einsatzes sowie des Themenfeld „cross compliance“ von großem Interesse erscheint:

- Stofflich-chemische Zusammensetzung (Hauptnährstoffe, Spurenelemente, Schwermetalle, organische Schadstoffe) sowie Hygienestatus
- Wirksamkeit der Nährstoffe (insbesondere der düngerrelevanten Hauptnährstoffe N, P, K) unter Berücksichtigung von Ertragsquantität und -qualität
- Ausbringungseigenschaften (Geruch, Ablauf-, Infiltrationsverhalten)
- Nährstoffabgasungs- und Nährstoffauswaschungspotenzial

Eigenschaften von Fermentationsrückständen

In einer österreichweiten Beprobung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurden Fermentationsrückstände auf ihren Gehalt an Nährstoffen, Spurenelementen und Schwermetallen untersucht, sowie die im Rahmen der Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker- und Grünland (BMLFUW, 2001) vorgesehenen Hygieneparamete-

ter überprüft (MUCH ET AL. 2004; PÖTSCH ET AL. 2004a, 2004b, und 2004c; SINGER 2005). Im Jahr 2005 wurden im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Universität für Bodenkultur zusätzlich Fermentationsrückstände aus Biogasanlagen untersucht, die schwerpunktmäßig mit NAWAROS (nachwachsenden Rohstoffen bzw. Energiepflanzen) beschickt wurden.

Die im Biogasprozess entstehenden Fermentationsrückstände stellen für den Betrieb einen wertvollen organischen Dünger dar, die gegenüber unfermentierten Wirtschaftsdüngern einige spezifische Besonderheiten aufweisen. So handelt es sich bei den Fermentationsrückständen aus Biogasanlagen um sehr gut wirksame Mehrnährstoffdünger, die aufgrund eines engeren C:N-Verhältnisses und einem höheren Anteil an leicht löslichem, pflanzenverfügbarem Stickstoff eine verbesserte direkte Pflanzenverfügbarkeit und damit einen höheren Düngewert besitzen (MESSNER 1988, DOSCH 1996).

Grundsätzlich führt die Vergärung von organischer Biomasse zum Abbau der organischen Trockensubstanz (24–80 %, AMON & DÖHLER 2004) und zu einem Umbau der Nährstoffe in eine für die Pflanzen leichter verfügbare Form. Ein Teil des organisch gebundenen Stickstoffs wird in die leicht lösliche Ammoniumform überführt und steht den Pflanzen somit direkt zur Verfügung. Ebenso erfährt auch ein Teil des Phosphats eine Umwandlung in die anorganische und somit besser pflanzenverfügbare Form. Calcium, Kalium und Magnesium werden durch die Vergärung des Substrats mengenmäßig nicht verändert. Der Gehalt an Schwefel wird durch die Bildung von Schwefelwasserstoff reduziert. Da aber der gebildete Schwefelwasserstoff als Gasbestandteil unerwünscht ist, kommt es im weiteren Verlauf der Biogasgewinnung zu einer Entschwefelung des Biogases und somit zu einer Rückführung des Schwefels in den Kreislauf.

Deutlich verbessert sind bei gut vergorenen Fermentationsrückständen auch wichtige Ausbringungseigenschaften wie Ablauf- und Infiltrationsverhalten (Viskosität). Positiv zu beurteilen ist auch die Verbesserung der aus der Sicht von Nichtlandwirten besonders häufig kritisierten Geruchsintensität. Geruchsaktive Substanzen und organische Säuren werden durch die Fermentierung weitgehend eliminiert (AMON & DÖHLER 2004). Die Senkung des Gehaltes an organischen Säuren trägt sowohl zur Verminderung des Geruchs als auch zur Verringerung der Verätzungsgefahr gedüngter Pflanzen bei.

Vor allem bedingt durch den Einsatz externer, nicht landwirtschaftlicher Cosubstrate kann es in Fermentationsrückständen aber auch zu Problemen im Gehalt an Schwermetallen sowie im Hygienezustand kommen. Zu berücksichtigen ist ebenfalls, dass bedingt durch einen höheren pH-Wert insbesondere bei einem hohen Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ eine verstärkte Ammoniakabgasung auftreten kann. Ammoniakemissionen und auch Stickstoffverluste durch Nitratauswaschung können aber wesentlich reduziert werden, wenn man auf die richtige Ausbringtechnik (Exaktverteilttechnik, bodennah), den richtigen Zeitpunkt (in die Vegetation) und auf die richtige, pflanzenbedarfsgerechte Düngungsmenge achtet (EDER ET AL. 1997, AMON ET AL. 1998, WULF ET AL. 2002).

Sachgerechter Einsatz von Fermentationsrückständen

Hinsichtlich eines sachgerechten Einsatzes von Fermentationsrückständen ist besonders auf die bestehenden Obergrenzen für die N-Düngung zu achten. Dies betrifft zunächst die mit 175 respektive 210 kg N pro ha und Jahr festgelegte, bewilligungsfreie Grenze gemäß Wasserrechtsgesetz (WRG 1959, idF 2005) sowie die im österreichischen Aktionsprogramm Nitrat

(2003) bestehende Grenze von 170 kg N pro ha und Jahr aus Dung (respektive 230 kg N pro ha und Jahr mittels Ausnahmeantrag unter Einhaltung bestimmter Auflagen).

In diesem Zusammenhang galt es abzuklären, wie bei gemeinsamer Fermentation von Wirtschaftsdüngern und anderen Cosubstraten diese N-Grenze für Dung zu beurteilen bzw. eventuell neu zu berechnen ist. Nach den Richtlinien für die sachgerechte Düngung (BMLFUW, 1999; 2006) sowie der Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Biogasgülle und Gärrückständen im Acker- und Grünland (BMLFUW, 2001) darf der nicht aus dem Wirtschaftsdünger stammende N-Anteil herausgerechnet werden. Dieser N-Anteil wird also für die N-Obergrenze aus Dung im Aktionsprogramm Nitrat (2003) nicht berücksichtigt. Für die Einhaltung der N-Obergrenzen im Wasserrechtsgesetz (WRG 1959 idF 2005) ist dieser Anteil allerdings anzurechnen.

Im Aktionsprogramm Nitrat (2003) sind eine Reihe von Ausbringungsbeschränkungen für Wirtschaftsdünger respektive für N-haltige Düngemittel und damit auch für Fermentationsrückstände enthalten. Dies betrifft zeitlich festgelegte Verbotszeiträume, Ausbringungsverbote bei bestimmten Bodenverhältnissen (gefroren, wassergesättigt bzw. überschwemmt oder schneebedeckt), Regelungen bei der Düngung in Hanglagen sowie im Nahbereich von Gewässern und die Einhaltung einer Mindestlagerkapazität. All diese Regelungen sind auch bei Einsatz von Fermentationsrückständen (Biogasgülle und Gärrückstände) zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind aber auch die elementaren Grundregeln der Düngung zu beachten. Die Richtlinien für eine sachgerechte Düngung liefern dazu die entsprechenden Grundlagen und sind zugleich eine wesentliche Voraussetzung für das ÖPUL (Österreichisches Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft).

Im Zuge der Reform der gemeinsamen Agrarpolitik hat die Europäische Union durch die Einführung der einheitlichen Betriebsprämie nicht nur das Modell der landwirtschaftlichen Ausgleichszahlungen im Marktordnungsbereich geändert, sondern diese auch an die Einhaltung der so genannten „Cross Compliance“-Bestimmungen geknüpft. „Cross Compliance“ umfasst Grundanforderungen an die Betriebsführung in den drei Bereichen Umwelt, Gesundheit (Mensch, Tier und Pflanze) sowie Tierschutz. Es handelt sich dabei um keine neuen, sondern um bereits gültige gesetzliche Bestimmungen, die von allen Landwirten einzuhalten sind. Im Falle einer Nichteinhaltung erfolgt eine prozentuelle Kürzung der Direktzahlungen. Der Bereich Umwelt umfasst unter anderem auch den Grundwasserschutz sowie den Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat.

Hinsichtlich der Wirtschaftsweise ist zu beachten, dass für biologisch wirtschaftende Betriebe zusätzliche Auflagen bestehen. Dies betrifft nicht nur den Einsatz von Cosubstraten, wonach alle in der Biogasanlage vergorenen Ausgangsmaterialien für Biobetriebe gemäß EU-VO 2092/91 als Düngemittel erlaubt sein müssen, sondern auch die gegenüber konventionellen Betrieben strengeren Grenzwerte hinsichtlich des Schwermetallgehaltes in den Fermentationsrückständen. Biobetriebe, die Fermentationsrückstände von externen Biogasanlagen beziehen, sollten bei Unklarheiten entsprechende Informationen bei ihrer Kontrollstelle einholen.

Kreislaufschließenden Düngung

Beim Anbau von Energiepflanzen für Biogasanlagen wird der oberirdische Aufwuchs bis zu einer Stoppelhöhe von 10 bis 15 cm geerntet. Die Nährstoffabfuhr kann auf Basis von

Ganzpflanzenerträgen zur Milch- bis Teigreife (25–30 % TM) kalkuliert werden und sind in Tabelle 79 aufgelistet. Das unterschiedliche Ertragsniveau berücksichtigt die Stellung der Energiepflanze als Haupt- oder Zwischenkultur.

Tabelle 79: Nährstoffabfuhr (Stickstoff, Phosphor und Kalium) verschiedener Energiepflanzen in Abhängigkeit vom Ertragsniveau (nach KARPENSTEIN-MACHAN, 2005)

| Energiepflanze | | Erträge (t TM ha ⁻¹) | Nährstoffabfuhr (kg ha ⁻¹) | | |
|---------------------|-----------|-------------------------------------|--|--|------------------------------|
| | | | Stickstoff (N) | Phosphor (P ₂ O ₅) | Kalium (K ₂ O) |
| Winter- getreide | Roggen | 12 | 163 | 66 | 202 |
| | | 16 | 218 | 88 | 270 |
| | Triticale | 12 | 132 | 63 | 188 |
| | | 16 | 176 | 84 | 251 |
| | Gerste | 9 | 124 | 50 | 130 |
| | | 14 | 193 | 77 | 202 |
| Weidelgras | | 9 | 117 | 60 | 119 |
| | | 12 | 156 | 80 | 159 |
| Sonnenblume | | 9 | 143 | 74 | 358 |
| | | 16 | 254 | 132 | 636 |
| Mais | | 9 | 132 | 58 | 169 |
| | | 16 | 235 | 103 | 301 |

Durch die Düngung der Gärrückstände gelangen die Nährstoffe wieder auf die Anbauflächen zurück (Kreislaufwirtschaft). Eine Düngeempfehlung kann auf Basis der Abfuhr an Nährstoffen durch das Erntegut abgeleitet werden, wobei wie auch bei der Ermittlung der Nährstoffempfehlungen in der sachgerechten Düngung eine Standortsnachlieferung zu berücksichtigen ist. Anzustreben ist grundsätzlich eine in Bezug auf die Fruchtfolge ausgeglichene Nährstoffbilanz.

Im Energiepflanzenanbau können durch eine artenreiche Fruchtfolge mit Haupt- und Zwischenfrüchten bzw. mehrschnittigen Wiesen Fermentationsrückstände mehrmals im Jahr bedarfsgerecht zur Ernährung der Pflanzen eingesetzt werden (KARPENSTEIN-MACHAN, 2005). Im Vergleich zum Pflanzenanbau zur Erzeugung von Lebensmitteln oder Tierfutter ist im Energiepflanzenanbau der Zeitraum verlängert, in dem die Ackerflächen Pflanzenbewuchs besitzen. Die Rückführung von Fermentationsrückständen zur Düngung der landwirtschaftlichen Anbauflächen trägt auch maßgeblich zur Senkung des Einsatzes von Mineraldünger bei.

Fazit

Fermentationsrückstände aus Biogasanlagen (Biogasgülle und Gärrückstände) eignen sich grundsätzlich sehr gut zur Nährstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturen, insbesondere für viehlose Betriebe, die keinen Zugriff auf Wirtschaftsdünger besitzen. Im Vergleich zum unvergorenen Wirtschaftsdünger sind Fermentationsrückstände geruchsärmer, homogener, pflanzenverträglicher und Stickstoff und Phosphor sind schneller pflanzenverfügbar (AMON & DÖHLER 2004, KARPENSTEIN-MACHAN 2005).

Allgemein betrachtet sollten bei Anwendung von Fermentationsrückständen neben der Einhaltung der einschlägigen gesetzlichen Bestimmungen für die Düngung vor allem die Problembereiche Schwermetallgehalt, Hygiene, NH₃-Abgasung und gesamtbetrieblicher Nährstoffhaushalt beachtet werden, um einen nachhaltig sach- und umweltgerechten Einsatz der Fermentationsrückstände zu gewährleisten.

In Bezug auf die Rückstände aus der Vergärung von Energiepflanzen (vorliegendes Projekt) ist aber klar hervorzuheben, dass die Hygiene und der Schwermetallgehalt keine Probleme darstellen. Problematisch ist dies vor allem, wenn nicht betriebseigene Substrate zur Vergärung herangezogen werden (z.B. Lebensmittelindustrie).

5.8 Gasreinigung, Gasaufbereitung und Gasnutzung (Arbeitsschwerpunkt 3.1, 3.2 und 3.3)

Das in Biogasanlagen produzierte Biogas ist wasserdampfgesättigt und beinhaltet neben den Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid auch in geringen Mengen andere Stoffwechselprodukte aus dem anaeroben Abbauprozess. Leicht flüchtige Stoffe, die im Substrat vorliegen oder im Zuge des anaeroben Abbaus gebildet werden, werden aus dem Gärsubstrat ausgegast und reichern sich folglich in der Gasphase an. Aus diesem Grund enthält Biogas neben dem nutzbaren Methan eine Reihe an Begleitkomponenten, die je nach Nutzung des Biogases für das Verwertungssystem schädlich sind, die Nutzungseffizienz vermindern, zu unzulässigen Schadgasemissionen führen oder eine Vermischung mit anderen gasförmigen Energieträgern nicht zulassen. Die verschiedenen Gasnutzungswege stellen unterschiedliche Ansprüche an die Gasqualität. Die Qualitätsanforderungen an das Biogas werden im Wesentlichen durch folgende Faktoren bestimmt (nach WEILAND 2003a):

- Emissionsgrenzwerte für Verbrennungsgase
- Korrosionsverhalten der eingesetzten Werkstoffe für Gastransport, -lagerung und Gasnutzung
- Standfestigkeit von Betriebsmitteln (Motoröl)
- Empfindlichkeit von Katalysatoren gegenüber Katalysatorgiften
- Querschnitte von Düsen und Spalten in Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen (Gefahr der Verstopfung durch Partikel)
- Qualitätsstandards von zertifizierten Kraftstoffen und gasförmigen Energieträgern
- Funktionsverhalten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (Vereisung)

Eine direkte Nutzung des Rohgases von Biogasanlagen ist aufgrund der beiden Inhaltsstoffe Wasserdampf und Schwefelwasserstoff in der Regel nicht möglich. Bei der Verwertung von Biogas kommt es aufgrund dieser beiden Komponenten zur Schwefelsäurebildung. Diese Säure greift die zum Einsatz kommenden Motoren sowie vor- und nachgeschaltete Bauteile (Gasleitungen, Abgasleitungen usw.) an. Eine Gastrocknung und Entschwefelung sowie eine Partikelabscheidung durch z.B. Kiesfilter ist somit für jeden Nutzungsweg des Biogases erforderlich. Welche Aufbereitungsschritte für die einzelnen Nutzungswege notwendig sind, wird in Abbildung 31 dargestellt.

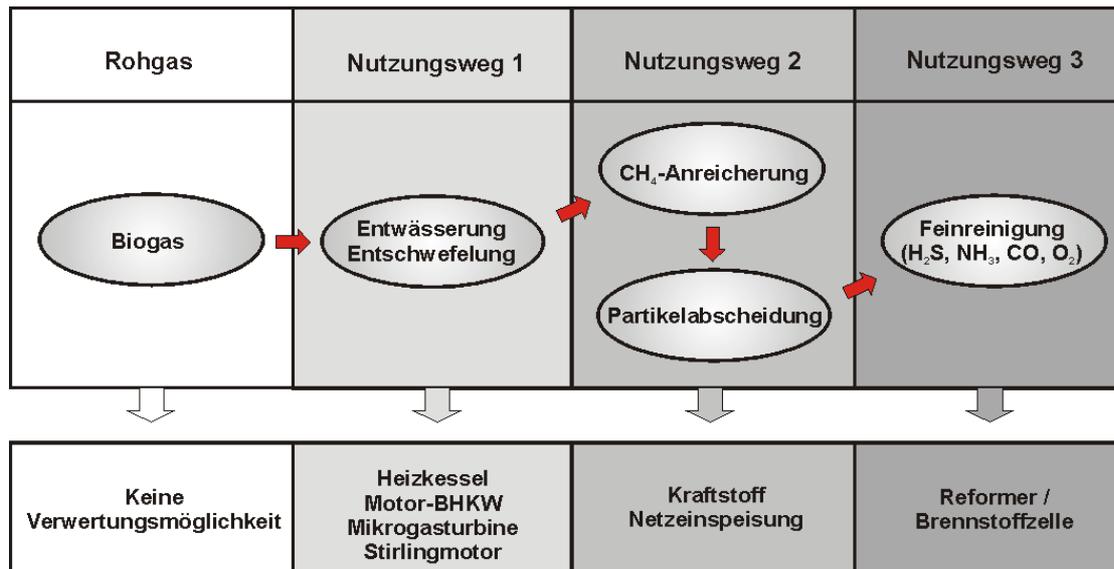


Abbildung 31. Erforderliche Aufbereitungsschritte für die einzelnen Nutzungswegen (verändert nach WEILAND 2003a)

5.8.1 Anforderungen an die Gasreinigung bzw. -aufbereitung entsprechend den einzelnen Nutzungswegen

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Gasreinigung bzw. -aufbereitung entsprechend den einzelnen Nutzungswegen erläutert.

Nutzungsweg 1

Die rein thermische Verwertung von Biogas in Heizkesseln erfordert den geringsten Grad der Biogastrocknung und Entschwefelung. Derzeit kommen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Nutzungsweg 1 für die Trocknung des Biogases nahezu ausschließlich Verfahren zum Einsatz, die auf Kühlung des Gases beruhen.

In Hinblick auf das eingesetzte Entschwefelungsverfahren werden derzeit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Nutzungsweg 1 am häufigsten biologische Oxidationsverfahren direkt im Gasraum des Fermenters eingesetzt. Diese Technik ist kostengünstig sowie wartungs- und störfallarm. Eine Erhebung von OHEIM (1999) an deutschen Biogasanlagen zeigte, dass dieses Entschwefelungsverfahren bei über 90 % aller Anlagen eingesetzt wurde. Neuere Erhebungen (FAL, 2005) weisen die biologische Entschwefelungstechnik auch weiterhin als das vorherrschende System aus (89 % der bewerteten Anlagen). In einem am Institut für Landtechnik laufenden FFG-Projekt (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH) „Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen“ besitzen alle in der Untersuchung stehenden 41 Biogasanlagen ein biologisches Entschwefelungsverfahren.

Wenn die biologische Entschwefelung nicht ausreicht, kann diese mit einer chemischen Entschwefelung kombiniert werden (Zugabe von Eisensalzen). Eine alleinige Entschwefelung durch chemische Verfahren im Fermenter ist nicht zu empfehlen, da der kontinuierliche Chemikalienverbrauch die Betriebskosten der Biogasanlage extrem erhöhen würde.

Bei Einsatz von Biogas in Mikrogasturbinen liegt das Hauptaugenmerk bei der Gasaufbereitung auf der Trocknung des Biogases, da Mikrogasturbinen relativ hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen tolerieren (KRAUTKREMER 2003a). Ein zu hoher Wasserdampfgehalt im Biogas

führt zur Kondensatbildung im Brennstoffsystem, wodurch Startschwierigkeiten, Druckschwankungen und Verbrennungsinstabilitäten, Korrosion sowie ein Ausfall der Ventile auftreten können (KRAUTKREMER 2003a). In Tabelle 80 werden die Anforderungen an die Reinheit des Biogases bei der Verwertung in Mikrogasturbinen aufgeführt.

Tabelle 80. Anforderungen an das Biogas bei der Nutzung in Mikrogasturbinen (nach KRAUTKREMER 2003a)

| Komponente | Einheit | Anteil |
|---------------------|---------|----------|
| Brennbarer Anteil | Vol. % | 30–100 |
| Wasserstoff | Vol. % | 0–5 |
| Wasserdampf | Vol. % | 0–5 |
| Sauerstoff | Vol. % | 0–10 |
| Kohlendioxid | Vol. % | 0–50 |
| Stickstoff | Vol. % | 0–50 |
| Schwefelwasserstoff | ppmV | 0–70.000 |

Nutzungsweg 2

Bei der Nutzung von Biogas als Kraftstoff oder für eine Einspeisung ins Erdgasnetz ist eine wesentlich intensivere Gastrocknung und Entschwefelung notwendig. Das Biogas muss soweit aufbereitet werden, dass es kompatibel mit Erdgas in den Gasleitungen ist (Tabelle 81). Die geforderte Gasqualität in Österreich (ÖVGW RL G31) behandelt derzeit nicht den Methangehalt (HORNBACHNER ET AL. 2005).

Tabelle 81. Qualitätsanforderungen für Biogasnetzeinspeisung in Österreich (nach HORNBACHNER ET AL. 2005)¹

| Komponente | Einheit | Anteil |
|----------------------|----------------------|--|
| Sauerstoff | Vol. % | ≤ 0,5 |
| Wasserstoff | Vol. % | ≤ 4 |
| Kohlendioxid | Vol. % | ≤ 2 |
| Stickstoff | Vol. % | ≤ 5 |
| Gesamtschwefel | mg S m ⁻³ | < 10 |
| Wasserdampf-Taupunkt | °C | maximal -8 (bei einem Druck von 40 bar) |
| Relative Dichte | | 0,55–0,65 |
| Wobbe-Index | kWh m ⁻³ | 13,3–15,7 |
| Brennwert | kWh m ⁻³ | 10,7–12,8 |

¹ Bezugspunkt Einspeisung
k.A. = keine Angaben

Zur Gastrocknung kommen bei diesem Nutzungsweg Adsorptionsverfahren zum Einsatz (HARASEK 2006). Die verwendeten Adsorbien können nach einer Beladung durch Erhitzung wieder

regeneriert werden. Eine Trocknung kann auch durch eine Gaswäsche mit Triethylenglykol erfolgen, welches bei einer Temperatur von ca. 200°C regeneriert werden kann (SHOEMAKER ET AL. 2000).

Von entscheidender Bedeutung bei Nutzungsweg 2 ist der Methangehalt, welcher ausschlaggebend für den Heizwert des Biogases ist. Es wird zwischen L-Gas (low gas) und H-Gas (high gas), d.h. Gas mit niedrigem und hohem Heizwert, unterschieden. Bei L-Gas muss ein Methangehalt von wenigstens 90 Vol.% (Wobbe-Index 37,8–46,8 MJ m⁻³) und bei H-Gas von wenigstens 96 Vol.% (Wobbe-Index 46,1-56,5 MJ m⁻³) erreicht werden (TENTSCHER 2001, WELLINGER 2001). Das zu Treibstoff oder auf Erdgasqualität aufbereitete Biogas wird häufig als „Bio-Erdgas“ oder „Greengas“ bezeichnet (SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003). Es würde sich aber auch der Begriff „Biomethan“ anbieten, der in jüngster Zeit Verwendung findet (BERGMAIR 2006). Die Überlegung hinter dem Begriff des Biomethans ist, dass es sich um den Energieträger „Methan“ handelt, der aus biologischen (= „Bio“), erneuerbaren und nachhaltigen Quellen des Umfeldes der landwirtschaftlichen Urproduktion stammt. Im nachfolgenden Text wird das auf Erdgasqualität aufbereitete Biogas als „Greengas“ bzw. „Biomethan“ bezeichnet.

Die Qualitätsanforderungen an Greengas bzw. Biomethan werden in Tabelle 82 vergleichend mit dem Rohbiogas dargestellt. Die von SCHULTE-SCHULZE BERNDT (2003) definierte Greengasqualität entspricht in etwa der H-Gasqualität von TENTSCHER (2001) und WELLINGER (2001).

Tabelle 82. Qualitätsanforderungen an Greengas im Vergleich zu Rohbiogas (nach SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003)

| Komponente | Einheit | Rohbiogas | Greengas |
|---------------------|---------------------|-----------|----------|
| Methan | Vol. % | 55–70 | > 97 |
| Kohlendioxid | Vol. % | 30–45 | < 1 |
| Stickstoff | Vol. % | < 2 | < 2 |
| Sauerstoff | Vol. % | < 0,5 | < 0,5 |
| Schwefelwasserstoff | ppm | < 500 | < 2 |
| Kohlenwasserstoffe | ppm | < 100 | < 10 |
| Wasser | g m ⁻³ | gesättigt | < 0,03 |
| Brennwert | kWh m ⁻³ | 6–7,5 | max. 11 |

Die kritischen Komponenten im Rohbiogas im Bezug auf die spätere Verwendung als Treibstoff oder Erdgassubstitut sind neben Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff vor allem Schwefelwasserstoff und Wasser. Kohlendioxid muss auf einen Wert von ca. 1 Vol.% reduziert werden, um den Brennwert des Gases zu erhöhen. Die derzeit gültigen Richtlinien in Österreich (ÖVGW RL G31) geben noch einen Grenzwert von ≤ 2 Vol.% für Kohlendioxid vor (siehe Tabelle 81).

In Bezug auf das Entschwefelungsverfahren kommen nach SCHULZ ET AL. (2003) in der Praxis am häufigsten chemische Adsorptionstechniken vor. Biologische Entschwefelungsverfahren können zwar unter optimalen Bedingungen einen Abscheidegrad von bis zu 99 % erreichen, sind jedoch bei Schwankungen der Rohgaszusammensetzung mit einem zu hohen Unsicherheitsfaktor belegt. Bei der Nutzung von Biogas als Kraftstoff oder für eine Einspeisung ins Erd-

gasnetz werden deshalb biologische Entschwefelungsverfahren nur in Kombination mit Adsorptions- oder Absorptionsverfahren eingesetzt (WEILAND 2003a).

Bei Nutzungsweg 2 liegt das Hauptaugenmerk auf der Methananreicherung durch die Entfernung von CO₂. Nach WEILAND (2003a) kommen für die Abtrennung von Kohlendioxid gegenwärtig vorzugsweise Druckwechseladsorptionsverfahren sowie Druckwasserwäschen zur Anwendung. Weniger verbreitet sind bislang Membranverfahren und Kryoverfahren. In Österreich erfahren Membranverfahren aber derzeit eine Förderung durch den F&E-Bereich (HORNBACHNER ET AL. 2005). Nach BACH (2003) ist die nasse Gaswäsche das heute in Europa verbreitetste Verfahren zur Aufbereitung von Biogas.

Nutzungsweg 3

Die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen befindet sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium (F&E-Stadium). Erste Pilotanlagen sind seit kurzem im Betrieb. Die Nutzung von Biogas in Brennstoffzellen stellt besonders hohe Ansprüche an die Gasqualität. Sie erfordert eine Feinstreinigung des Biogases, alle Schadstoffe müssen entfernt werden (WEILAND 2003a).

Brennstoffzellen sind elektrochemische Geräte, die in der Lage sind, die in einem Brenngas enthaltene chemische Energie durch kontrollierte elektrochemische Reaktionen in elektrische Energie umzuwandeln. Brennstoffzellen werden nach dem zum Einsatz kommenden Elektrolyten benannt, da dieser die Betriebseigenschaften maßgeblich beeinflusst (OTT & TAMM 2003). An den Methangehalt des Brenngases stellen relevante Brennstoffzellenbauarten geringe Anforderungen, da die internen elektrochemischen Reaktionen auch bei Verdünnung ablaufen können. Das im Biogas enthaltene Wasser ist im Prinzip sogar erwünscht, da bei den Reaktionen im Reformier stöchiometrisch für jedes Methanmolekül zwei Wassermoleküle benötigt werden (OTT & TAMM 2003).

Das Hauptaugenmerk bei der Aufbereitung von Biogas für eine Nutzung in Brennstoffzellen liegt bei der Entschwefelung. Bevor das Gas in den Reformier gelangt, muss es entschwefelt werden, da die Katalysatoren der Reformier und Brennstoffzellen durch Schwefelwasserstoff schwer geschädigt werden können. Nach LEDJEFF-HEY ET AL. (2001) kommen für die Entschwefelung in Kleinanlagen spezielle Aktivkohlefilter zum Einsatz. Bei größeren Anlagen werden des öfteren ZnO-Betten eingesetzt, in denen der Schwefelwasserstoff zu Wasser und Zinksulfid reagiert. Auf diese Weise können auch Mercaptane und teilweise COS (Carbonylsulfid) entfernt werden, nicht jedoch Thiophene. Thiophene müssen mit Hilfe eines weiteren Katalysators und einer Wasserzudosierung zu Schwefelwasserstoff umgesetzt werden (LEDJEFF-HEY ET AL. 2001). Nach OTT & TAMM (2003) werden alle bisher etablierten Entschwefelungsverfahren für den Einsatz in Brennstoffzellen erprobt. Dazu zählen OTT & TAMM (2003) beispielsweise die Druckwechseladsorption, biologische oder chemische Entschwefelungsverfahren. OTT & TAMM (2003) weisen aber auch auf die Nachteile der verschiedenen Verfahren hin; hohe Betriebskosten der chemischen Verfahren, hohe Investitionskosten der Druckwechseladsorption und begrenzte Entschwefelungsleistung biologischer Verfahren.

5.8.2 Techniken zur Gasaufbereitung

Die verschiedenen Aufbereitungstechniken und Verfahren sind teilweise bereits gut entwickelt, jedoch müssen sie noch an die speziellen Anforderungen von Biogasanlagen angepasst wer-

den, die Rohstoffe der landwirtschaftlichen Urproduktion im engeren und weiteren Sinne für die Biomethanerzeugung einsetzen. Eine Standardisierung der verschiedenen Reinigungsstufen wäre notwendig, um einfache Verfahrenskombinationen zu ermöglichen, die eine Anpassung an die notwendige Gasqualität des jeweiligen Nutzungsweges ermöglichen (WEILAND 2003a). In dieser Hinsicht besteht noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Neben einer Technologieverbesserung besteht auch das Bestreben die Aufbereitungskosten zu senken (WEILAND 2003a). Die verschiedenen Aufbereitungstechniken, die für die einzelnen Nutzungswege erforderlich sind, werden nachfolgend erläutert.

5.8.2.1 Entwässerung

Die relative Feuchte von Biogas beträgt im Fermenter 100 %, d.h. das Biogas ist wasserdampfgesättigt. Um die Gasverwertungsaggregate vor hohem Verschleiß und Zerstörung zu schützen, muss der Wasserdampf aus dem Biogas entfernt werden. Die zur Trocknung eingesetzten Techniken werden in Tabelle 83 dargestellt.

Tabelle 83. Verfahren zur Entwässerung von Biogas (nach WEILAND 2003a)

| Grundoperation | Verfahren | Trenneffekt |
|----------------|---|---|
| Kühlung | Kondensation | Unterschreitung des Taupunkts von Wasser |
| Adsorption | Silica-Gel-Verfahren, Aktivkohle-Verfahren, Molekularsieb-Verfahren | Reversible Bindung von Wasser an feste Adsorbentien |
| Absorption | Glykol-Verfahren | Lösung von Wasser in Triethylenglykol |

Die technisch einfachste Form zur Entwässerung des Biogases ist die Kühlung. Dieses Verfahren wird derzeit in allen landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Nutzungsweg 1 angewendet. Die Kühlung des Biogases erfolgt zumeist innerhalb von erdverlegten Gasleitungen, da der Kühleffekt bei unterirdischen Leitungen höher ist. Durch ein entsprechendes Gefälle beim Verlegen der Gasleitung wird das Kondensat in einem am tiefsten Punkt der Gasleitung eingebauten Kondensatabscheider gesammelt und aus dem gasführenden System ausgeschleust. Voraussetzung für die Kühlung des Biogases in der Gasleitung ist allerdings eine ausreichende Länge der Gasleitung. Neben dem Wasserdampf wird durch das Kondensat ein Teil weiterer unerwünschter Inhaltsstoffe wie wasserlösliche Gase und Aerosole aus dem Biogas entfernt. Die Kondensatabscheider müssen regelmäßig entleert werden, weshalb sie gut zugänglich sein müssen. Das Einfrieren der Kondensatabscheider muss durch frostfreien Einbau unbedingt verhindert werden (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Für die Nutzung von Biogas als Kraftstoff oder für eine Einspeisung ins Erdgasnetz (Nutzungsweg 2) führt die einfache Kühlung nicht zu einer ausreichenden Trocknung des Gases. Für den Nutzungsweg 2 werden häufig Adsorptionsverfahren verwendet. Die zum Einsatz kommenden Adsorbentien können nach der Beladung durch Erhitzung wieder regeneriert werden. Eine Gastrocknung kann auch durch eine Gaswäsche mit Triethylenglykol erfolgen, welches bei einer Temperatur von ca. 200°C regeneriert werden kann (SHOEMAKER ET AL. 2000).

5.8.2.2 Entschwefelung

Die Entfernung von Schwefelwasserstoff ist bei allen Nutzungswegen erforderlich. Es wurde eine Vielzahl an Methoden entwickelt, die auf biologischen, physikalischen und chemischen Grundoperationen basieren (MUCHE ET AL. 1998). In Tabelle 84 sind die wichtigsten Verfahren zur Entschwefelung von Biogas zusammengestellt.

Tabelle 84. Verfahren zur Entschwefelung von Biogas (nach WEILAND 2003a)

| Grundoperation | Verfahren | Trenneffekt |
|-----------------------|--|---|
| Biologische Oxidation | Biofiltration im Biowäscher, Eintrag von Luft in den Fermenter | Mikrobielle Oxidation von H ₂ S unter Bildung von S, SO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ |
| Chemische Adsorption | Raseneisenerz, Jodierte Aktivkohle | Chemische Reaktion von H ₂ S mit Eisenoxid, Katalytische Spaltung von H ₂ S mit S-Anlagerung |
| Chemische Fällung | Eisenchlorid-Methode | Ausfällung von H ₂ S als Fe ₂ S ₃ |
| Chemische Absorption | Alkalische Wäsche | Chemische Reaktion von H ₂ S mit Natronlauge |
| Adsorption | Aktivkohle-Verfahren, Molekularsieb-Verfahren | Adsorption von H ₂ S an Aktivkohle oder Molekularsieb |
| Membrantrennung | Semipermeable Membran | Membrandurchlässigkeit von H ₂ S höher als für CH ₄ und CO ₂ |

Zur Auslegung einer Biogasentschwefelungsanlage müssen folgende Berechnungsfaktoren ermittelt werden (nach ENTEC 2003):

- Gasdurchsatz in Nm³ h⁻¹ (maximal, minimal, durchschnittlich)
- Gaseintrittstemperatur in °C
- Gasdruck in mbar oder Pa
- Detaillierte Gaszusammensetzung (CH₄, CO₂, H₂S)
- Gewünschte Konzentration in ppm H₂S im Reingas

Biologische Entschwefelung im Fermenter

Die biologische Entschwefelung im Gasraum des Fermenters ist derzeit das häufigste Verfahren, das zur Senkung des Schwefelwasserstoffgehalts in Biogas bei Nutzungsweg 1 herangezogen wird (SCHULZ 2001). Dieses Verfahren ist für alle Fermenter geeignet, die einen Gasraum über dem Fermenter besitzen (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

In Tabelle 85 werden die Vor- und Nachteile der biologischen Entschwefelung im Fermenter aufgezeigt.

Tabelle 85. Vor- und Nachteile der biologischen Entschwefelung im Fermenter (nach SCHOLWIN ET AL. 2004a, HELMS 2002)

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> + sehr kostengünstig + wartungs- und störfallarme Technik | <ul style="list-style-type: none"> – keine Orientierung an der real freigesetzten Schwefelwasserstoffmenge – keine gezielte Optimierung des Schwefelwasserstoffabbaues möglich – mögliche Prozessbeeinträchtigung und Methanoxidation durch Sauerstoffeintrag – starke Korrosion an allen Bauteilen im Gasraum – Tag/Nacht- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen im Gasraum können ungünstig für die Entschwefelung sein – auf Schwankungen in der freigesetzten Gasmenge kann nicht reagiert werden |

Biologische Entschwefelung außerhalb des Fermenters

Bei der biologischen Entschwefelung von Biogas in nachgeschalteten, separaten Biowäschern werden, wie bei der direkten Entschwefelung im Fermenter, Mikroorganismen zur H₂S-Entfernung eingesetzt (PRECHTL ET AL. 2003). Durch die räumliche Trennung der H₂S-Entfernung von der Biogasproduktion im Fermenter besteht die Möglichkeit, die für die Entschwefelung notwendigen Rahmenbedingungen wie Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr exakter einzuhalten (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Die räumliche Trennung stellt einen großen Unterschied und Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Entschwefelung im Fermenter dar, da eine gezielte automatisierte Optimierung des Schwefelwasserstoffabbaues durch Nährstoff-, Luftzufuhr- und Temperaturmanagement möglich ist. Die Entschwefelung findet in einem separaten Behälter statt, der in der Regel zwischen Fermenter und Gasspeicher/BHKW geschaltet wird.

Biowäscher können in Form von Säulen, Kesseln oder Containern aus Kunststoff oder Stahl ausgeführt sein und freistehend gefüllt mit Trägerkörpern installiert werden. In Tabelle 86 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile dieses Aufbereitungsverfahrens dargestellt.

Tabelle 86. Vor- und Nachteile der biologischen Entschwefelung außerhalb des Fermenters (nach SCHOLWIN ET AL. 2004a, HELMS 2002)

| Vorteile | Nachteile |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> + Dimensionierung auf die real freigesetzte Schwefelwasserstoffmenge möglich + gezielte automatisierte Optimierung des Schwefelwasserstoffabbaus durch Nährstoff-, Luftzufuhr- und Temperaturmanagement möglich + keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag + Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters + kein Chemikalieneinsatz notwendig + bei ausreichender Dimensionierung wirken sich kurzfristige Schwankungen in der Gasmenge nicht negativ auf die Gasqualität aus | <ul style="list-style-type: none"> – zusätzliches, mit Kosten verbundenes Aggregat – zusätzlicher Wartungsaufwand |

Mit Biowäschern können je nach Belastung Abscheidgrade von bis zu 99 % erreicht werden. Die Verfahrenstechnik ist für alle Biogasanlagendimensionen erhältlich (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Da die Mikroorganismen relativ träge auf Änderungen des Schwefelwasserstoffgehalts reagieren, kann es bei sprunghafter Änderung des H₂S-Gehalts zu einem Durchbruch des Biowäschers kommen. Aus diesem Grund ist dieses Verfahren nur für den Nutzungsweg 1 zu empfehlen. Bei Aggregaten mit geringer H₂S-Verträglichkeit (Nutzungsweg 2 und 3) ist ein nachgeschaltetes Adsorptions- oder Absorptionsverfahren notwendig (WEILAND 2003a).

Chemische Entschwefelung im Fermenter

Bei der chemischen Entschwefelung im Fermenter wird dem Gärsubstrat eine chemische Substanz zugeführt, die Schwefel chemisch bindet (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Durch gezielte Zugabe von Eisensalzen in den Fermenter wird eine stöchiometrische Reduzierung der Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas erreicht (MUCHE ET AL. 1998). SCHOLWIN ET AL. (2004a) geben einen Verbrauch von 0,023 l Eisensalzen (Eisen-III-chlorid) pro m³ Biogas an. Sulfid geht in einer sehr schnell ablaufenden Reaktion mit Metallionen schwer lösliche Metallsulfidverbindungen ein (MUCHE ET AL. 1998).

Die chemische Entschwefelung eignet sich für alle Systeme der Nassvergärung. Mit dieser Methode kann jedoch der Schwefelwasserstoffgehalt nur auf 200 bis 500 ppm abgesenkt werden (SCHNEIDER ET AL. 2000). In der Regel wird die interne chemische Entschwefelung zusätzlich eingesetzt, wenn die biologische Entschwefelung im Gasraum des Fermenters nicht ausreicht (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Sie erfordert eine stetige manuelle oder automatische Dosierung der Eisensalze, die in Form von Lösungen, Presslingen oder Körnern verfügbar sind (WEILAND 2003a). Der kontinuierliche Chemikalienverbrauch führt zu relativ hohen laufenden Betriebskosten (WEILAND 2003a, SCHNELL 2003a).

In Tabelle 87 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung im Fermenter aufgezeigt.

Tabelle 87. Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung im Fermenter (nach SCHOLWIN ET AL. 2004a)

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> + sehr gute Abscheidraten + kein zusätzlicher Wartungsaufwand entsteht + auf die Eingangssubstratmasse bezogene Dosierung möglich + keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag + Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters + Schwankungen in der Gasfreisetzungsrates verursachen keine Qualitätseinbußen im Biogas | <ul style="list-style-type: none"> - Dimensionierung auf den Schwefelgehalt der Eingangssubstrate schwierig - Erhöhung der laufenden Betriebskosten durch kontinuierlichen Chemikalienverbrauch |

Chemische Entschwefelung außerhalb des Fermenters

Die chemische Entschwefelung außerhalb des Fermenters erfolgt durch eine alkalische Wäsche von Biogas mit Natronlauge oder durch eisenhaltige Reinigungsmassen.

Bei der alkalischen Wäsche mit Natronlauge erfolgt die Entschwefelung in einem einstufigen Gegenstromverfahren in freistehenden Säulen oder Kesseln aus Kunststoff, die mit einem Trägerkörper gefüllt sind und über eine Laugenrückspülung verfügen (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Das Verfahren eignet sich für alle Biogasanlagensysteme und kann an die jeweilige Dimensionierung angepasst werden. Wichtig ist es, durch geeignete Reaktionsführung die Auswaschung von Kohlendioxid zu vermeiden, um den Verbrauch an Natronlauge in einem wirtschaftlichen Rahmen zu halten (MUCHE ET AL. 1998). Die Natronlauge muss vor der Verwendung in der Entschwefelungsanlage mit Frischwasser verdünnt werden, um die Überschreitung des Löslichkeitsgrenzwerts sich bildender Verbindungen zu verhindern und die Reaktionswärme abzuleiten (ENTEC 2003). Die verbrauchte Lauge muss ersetzt und z.B. in Kläranlagen entsorgt werden (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Mit dem Entschwefelungsverfahren „alkalische Wäsche mit Natronlauge“ sind Reinigungsgrade oberhalb von 95 % möglich (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Bei Entschwefelungsanlagen mit eisenhaltigen Reinigungsmassen handelt es sich um turmförmige Behälter, die ein spezielles Eisenoxid in pelletierter Form beinhalten. Der Schwefelwasserstoff wird beim Durchleiten durch die Reinigungsmasse chemisch gebunden und aus dem Gas entfernt. Um den Verbrauch der Reinigungsmasse gering zu halten, wird dem Rohgas eine geringe Menge Luft (1–3 Vol.%) zugesetzt, wodurch ein Teil der Reinigungsmasse regeneriert wird (MUCHE ET AL. 1998). Die Entschwefelungsanlage besteht aus einem Edelstahlbehälter zur Aufnahme der pelletierten Reinigungsmasse. Die nachzufüllende frische Reinigungsmasse wird der Anlage von oben durch eine Eintragsschleuse zugeführt. Die entsprechende Menge verbrauchter Gasreinigungsmasse wird dem Behälter von unten durch eine Austragsschleuse entnommen (MUCHE ET AL. 1998). Das H₂S-haltige Gas wird im Gegenstrom von unten nach oben durch den Turm geleitet. Die Grobreinigung des Gases erfolgt im unteren Teil des Turms. Im oberen Teil des Turms, wo sich die frische, reaktionsfreudige Reinigungsmasse befindet, erfolgt die Feinreinigung des Gases (MUCHE ET AL. 1998). Bei einer Schwefelwasserstoffkonzentration von 1.000 ppm im Rohgas ist eine Reinigungsleistung bis unter 1 ppm H₂S möglich (MUCHE ET AL. 1998).

In Tabelle 88 werden die Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung außerhalb des Fermenters angeführt.

Tabelle 88. Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung außerhalb des Fermenters (nach SCHOLWIN ET AL. 2004a)

| Vorteile | Nachteile |
|---|--|
| + Dimensionierung auf die real freigesetzte Schwefelwasserstoffmenge möglich | - zusätzliches, mit Kosten verbundenes Aggregat |
| + gezielte automatisierte Optimierung der Schwefelwasserstoffabscheidung durch Laugen- und Temperaturmanagement möglich | - es entsteht ein Chemikalienbedarf |
| + keine Prozessbeeinträchtigung durch Sauerstoffeintrag | - zusätzlicher Eintrag von Frischwasser zur Laugenverdünnung notwendig (nicht bei Eisenoxid) |
| + Vermeidung starker Korrosion an Bauteilen im Gasraum des Fermenters | - zusätzlicher Wartungsaufwand |
| + kein Chemikalieneinsatz notwendig | |
| + Schwankungen in der Gasfreisetzungsrates verursachen keine Qualitätseinbußen im Biogas bei Überdimensionierung der Entschwefelung | |

Adsorptionsverfahren zur Entschwefelung

Unter Adsorption versteht man die Anreicherung von anorganischen und/oder organischen gasförmigen Schadstoffen an poröse Feststoffe, die eine große innere Oberfläche besitzen. Die Abscheidung von organischen Molekülen aus der Gasphase beruht entweder auf der Siebwirkung oder auf Anziehungskräften der obersten Molekülschicht der Adsorbentien. Die Adsorbentien sind die eigentlichen Träger des Verfahrens. Für die Adsorption von Schwefelwasserstoff eignen sich Molekularsiebe und Aktivkohle (ANGERER 1999). In Tabelle 89 sind die charakteristischen Unterscheidungsmerkmale zwischen den beiden Adsorbentien dargestellt. Für beide Materialien gilt, dass ihre sehr poröse Struktur eine große Kontaktfläche erzeugt.

Für die Adsorption sind neben der inneren Oberfläche der Adsorbentien noch Temperatur, Molekulargewicht, Siedepunkt sowie Konzentration des zu adsorbierenden Stoffes und der Druck maßgebend. Tiefe Temperatur und hoher Druck begünstigen die Adsorption (ANGERER 1999).

Tabelle 89. Charakteristische Stoffeigenschaften von Adsorptionsmitteln (SCHULTES 1996)

| | Hauptbestandteil | C | Al ₂ O ₃ – SiO ₂ |
|----------------------------|---------------------------------|------------|---|
| Stoffeigenschaft | Einheit | Aktivkohle | Molekularsieb |
| Korngröße | mm | 3–10 | 1–5 |
| Feststoffdichte | g cm ⁻³ | 2,0–2,2 | ~ 2,6 |
| Partikeldichte | g cm ⁻³ | 0,6–0,9 | 1,1–1,5 |
| Rütteldichte | g cm ⁻³ | 0,3–0,5 | 0,6–0,9 |
| Makroporendichte | cm ³ g ⁻¹ | 0,4–1,1 | 0,3–0,4 |
| Mikroporendichte | cm ³ g ⁻¹ | 0,25–0,5 | 0,25–0,3 |
| Spezifische Oberfläche | m ² g ⁻¹ | 600–1.500 | 500–1.000 |
| Spezifische Wärmekapazität | J (kg K) ⁻¹ | 840 | 920 |

Beim Adsorptionsverfahren mit Molekularsieben werden Zeolithe auf Basis von Alkali- oder Erdalkalialuminiumsilikaten eingesetzt (MUCHE ET AL. 1998). Ihre Kristallstruktur gibt Hohlräume definierter Größe vor. Je nach Eigenschaften adsorbieren Zeolithe selektiv nach der Molekülgröße oder nach der Polarität (MUCHE ET AL. 1998). Eine Adsorptionsanlage besteht zumeist aus drei Türmen. Im ersten Turm findet die eigentliche Reinigung – die Adsorption – statt. Der apparative Aufwand dieses Verfahrens ist sehr groß und es entsteht eine Gasfraktion mit sehr hohem Schwefelwasserstoffgehalt. Eine Aufbereitung des abgetrennten Gases ist derzeit auch bei großen Biogasanlagen nicht wirtschaftlich möglich (MUCHE ET AL. 1998).

Das Adsorptionsverfahren mit Aktivkohle ist verhältnismäßig einfach durchzuführen. Die Aktivkohle liegt in pelletierter Form in einem Behälter, durch den das Biogas, dem vorher Luft zudosiert wird, mit geringem Druckverlust durchgeleitet wird (MUCHE ET AL. 1998). Durch eine Jodimprägnierung der Aktivkohle kann die Entschwefelungsleistung gesteigert werden (SCHULZ ET AL. 2003). Das Verfahren wird bei 8 bar und Temperaturen von 50–70°C betrieben, um eine unerwünschte Wasserablagerung zu vermeiden (WELLINGER 2001).

Bei Aktivkohlen ist bei relativen Feuchtigkeitsgehalten >50 % mit einer Minderung der Beladung zu rechnen, während bei den makroporösen Polymeren und den hydrophoben Zeolithen kein gravierender leistungshemmender Einfluss festzustellen ist (KRILL 1993).

In Tabelle 90 werden die Vor- und Nachteile der Entschwefelung durch Adsorption aufgeführt.

Tabelle 90. Vor- und Nachteile der Entschwefelung durch Adsorption (nach KRILL 1993)

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| + hohe Selektivität für die abzuscheidende Komponente | – Schadstoffe werden auf einen Feststoff übertragen |
| + hohes Aufnahmevermögen auch bei geringen Konzentrationen | – Kosten für Verbrennung, Deponierung oder Regeneration des Feststoffes |
| + leichte Desorbierbarkeit nach der Beladung | – zusätzlicher Wartungsaufwand |
| + Beständigkeit bei Temperaturwechsel | |
| + Abriebfestigkeit | |
| + Beständigkeit gegen Gase, Lösemittel, Säuren, Laugen, Wasserdampf | |
| + hohe Hydrophobie | |

5.8.2.3 Methananreicherung

Die Methananreicherung durch die Entfernung von Kohlendioxid aus dem Biogas ist für die Nutzung von Biogas als Treibstoff oder für die Einspeisung ins Ergasnetz essentiell. Bedingt durch die Qualitätsanforderungen des Nutzungsweges 2 muss das Rohbiogas zu Greengas bzw. Biomethan aufbereitet werden, indem neben CO₂ die weiteren Verunreinigungen sicher, dauerhaft und kostengünstig entfernt werden (SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003).

Die derzeit verfügbaren Techniken zur Kohlendioxidabscheidung: die Gaswäsche, Adsorption, CO₂-Verflüssigung sowie trockene und nasse Membranverfahren, werden in Tabelle 91 angeführt. Während die Gaswäsche, die Membranverfahren und CO₂-Verflüssigung lediglich das CO₂ entfernen, weist das Adsorptionsverfahren mittels Aktivkohle und das Kohlenstoffmolekularsieb den Vorteil auf, dass zusätzlich Verunreinigungen wie Wasser, H₂S, höhere Kohlen-

wasserstoffe sowie teilweise O₂, N₂ und Siliziumverbindungen entfernt werden (SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003).

Nach WEILAND (2003a) kommen für die Abtrennung von Kohlendioxid gegenwärtig vorzugsweise Druckwechseladsorptionsverfahren sowie Druckwasserwäschen zur Anwendung. Nach Angaben von HARASEK (2006) liegt europaweit der Marktanteil von Druckwasserwäschen bei 55 % und für Druckwechseladsorptionverfahren bei 26 %. Weniger verbreitet waren bislang Membrantrennverfahren und Kryoverfahren, die sich weitgehend noch im F&E-Stadium befinden. Membrantrennverfahren finden aber in neuerer Zeit in Österreich zunehmend Förderung (HORNBACHNER ET AL. 2005), da es sich bei dieser Technologie um eine rückstandsfreie Betriebsweise (es werden keine Verbrauchsstoffe benötigt) handelt.

Tabelle 91. Verfahren zur Methananreicherung aus Biogas (nach SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003 und WEILAND 2003a)

| Grundoperation | Verfahren | Trenneffekt |
|--|--------------------------------------|---|
| Absorption | Druckwasserwäsche | CO ₂ wird mittels einer Waschflüssigkeit absorbiert (z.B. Wasser, Natronlauge, Monoethanolamin-Wäsche (MEA)) |
| Adsorption | Druckwechseladsorption | CO ₂ wird an einem Adsorptionsmittel (Kohlenstoffmolekularsieb) über elektrostatische Kräfte adsorbiert |
| Membrantrennverfahren trocken/nass | Polymembrangasabtrennung | CO ₂ wird aufgrund unterschiedlicher Permeationsraten an einer Membran abgetrennt und beim „nassen Verfahren“ von einer Absorptionsflüssigkeit aufgenommen |
| CO ₂ -Verflüssigung durch Kühlung | Tiefemperaturtrennung (Kyrotrennung) | Phasenabtrennung von flüssigem CO ₂ und gasförmigem Methan |

Methananreicherung durch Absorption

Beim „absorptiven Verfahren“ der Methananreicherung handelt es sich um ein „nasses Verfahren“ mittels Druckwäsche (SCHULZ ET AL. 2003). Als Absorptionsmittel kommen neben Wasser und Monoethanolamin, die Kohlendioxid chemisch binden, Polyethylenglykol zum Einsatz, das eine hohe Löslichkeit für Kohlendioxid aufweist (WEILAND 2003a). Bei diesen Verfahren wird die unterschiedliche Löslichkeit von Kohlendioxid und Methan in Wasser oder den oben erwähnten Lösungen ausgenutzt (SCHULZ ET AL. 2003).

Bei rein physikalischen Wäschen ist der Druck entscheidend, unter welchem die Absorption stattfindet. Bei Betriebsdrücken von 10–12 bar und einer Absorptionstemperatur von etwa 20°C wird das CO₂ in einer Gegenstrompackungskolonne mittels Brauchwasser („Druckwasserwäsche“) oder auch einer Polyethylen-Lösung (z.B. Selexol) absorbiert. Der Vorteil der Lösung gegenüber einem reinen Wasserbad liegt darin, dass sich CO₂ und H₂S hier besser lösen, sodass insgesamt weniger Flüssigkeit erforderlich ist und der energetische Aufwand für die Umwälzung sinkt. Mit dem Druckwäsche-Verfahren werden Methankonzentrationen >96 % bei 100 % Feuchte realisiert. Bei der chemisch-physikalischen Wäsche sind die Waschlösung und die zugehörige chemische Reaktion (beispielsweise mit Monoethanolamin (MEA)) von Bedeutung (SCHULZ ET AL. 2003).

Nach TENTSCHER & JANSSON (2003) liegt der große Vorteil des Druckwasserwäscheverfahrens in der geringen Selektivität des Absorptionsmittels Wasser, da neben Kohlendioxid auch Schwefelwasserstoff, Ammoniak, andere wasserlösliche Gase, Staub, Mikroorganismen etc. zurückgehalten werden. Vor allem die gleichzeitige Entschwefelung macht dieses Verfahren

sehr interessant. In Schweden werden zwischen 80 und 90 % des Klärgases mit nasser Gaswäsche aufbereitet. Ein Nachteil bei Verwendung von Absorptionsmitteln (z.B. Selexol) ist, dass das Recycling des Absorptionsmittels sehr aufwändig ist (HARASEK 2006).

Methananreicherung durch Adsorption

Beim „adsorptiven Verfahren“ der Methananreicherung handelt es sich um ein „trockenes Verfahren“ mittels Druckwechseladsorption (SCHULZ ET AL. 2003). Druckwechselverfahren verwenden in der Regel Molekularsiebe auf Kohlebasis, die bei erhöhtem Druck zu einer Bindung von Kohlendioxid und anderen Verunreinigungen wie H_2S , O_2 , N_2 und Wasser führen und bei Absenkung des Drucks die Komponenten wieder desorbieren (WEILAND 2003a).

Das Kernelement der adsorptiven Biogasaufbereitung ist der mit einem Kohlenstoffmolekularsieb gefüllte Adsorber (SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2003). Das Biogas wird über einen Verdichter in die Adsorberbehälter gepresst (SCHULZ ET AL. 2003).

Grundsätzlich ist es möglich, eine adsorptive Biogasaufbereitung mit nur einem Adsorber auszuführen. Um jedoch einen kontinuierlichen Produktgasstrom zu ermöglichen und zur Erhöhung der Anlageneffizienz, wird in der Regel mit mehreren Adsorbentien gearbeitet (SCHULZ ET AL. 2003). Meist werden vier Adsorptionstürme in Reihe geschaltet, die mit unterschiedlichem Druck betrieben werden (SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2001). Der Prozess wird deshalb Druck-Schwing-Verfahren (Pressure Swing Adsorption (PSA)) genannt (WELLINGER 2001).

Nach Aussage von BERMAIER (2005) verfügen adsorptive Verfahren hinsichtlich erreichbarer Reinheiten und Ausbeuten an Methan über ein großes Entwicklungspotenzial. Im Projekt Bio-Methan wurde zum Beispiel anstatt der üblicherweise verwendeten Adsorbentien auf Kohlebasis ein spezielles mit Diethylentriamin modifiziertes Polymer erfolgreich getestet (BERMAIER 2005). Aufgrund eines technologischen Vergleichs der derzeit in Österreich eingesetzten Aufbereitungstechnologien, schlägt BERMAIER (2005) als technisch und ökonomisch sinnvolles Gesamtkonzept für die Bereitstellung von direkt erdgasnetzfähigem Reingas vor, eine Kombination aus Druckwechseladsorption an Kohlenstoffmolekularsieben und extern belüfteten Bio-Tropfkörpern zur selektiven H_2S -Oxidation zu verwenden.

Methananreicherung durch Membranverfahren

Membrantrennverfahren basieren auf der besseren Membrandurchlässigkeit von CO_2 im Vergleich zu CH_4 aufgrund der unterschiedlichen Molekülgröße (WEILAND 2003a). Die zum Einsatz kommenden Membranen entscheiden über die Selektivität. Mittels Membrantrennung kann sowohl die gemeinsame Abtrennung von Kohlendioxid und Schwefeldioxid als auch die selektive Abtrennung von H_2S und CO_2 (Einsatz von zweistufigen Anlagen) durchgeführt werden (SCHULZ ET AL. 2003).

Werden die abgetrennten Gasbestandteile in Waschlösungen absorbiert, handelt es sich um ein nasses Membranverfahren. Bei einer gasförmigen Austragung spricht man von einem trockenen Membranverfahren. Das für den Trennprozess erforderliche Druckgefälle wird in der Regel durch einen Überdruck auf der Rohgasseite realisiert (SCHULZ ET AL. 2003).

Das aufbereitete Gas liegt mit einem vergleichsweise hohen Druck vor, der eine Einspeisung in das öffentliche Gasnetz erleichtert. Membrantrennverfahren werden aus Kostengründen in der Regel erst bei Rohgasströmen von über $500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ projektiert (SCHULZ ET AL. 2003).

Nach WEILAND (2003a) liegt der Nachteil dieser relativ einfachen Technik im geringen CO₂-Abscheidegrad (75–83 %) und dem hohen Energiebedarf infolge des erforderlichen hohen Betriebsdrucks (20–35 bar). Nach SCHULZ ET AL. (2003) wurden in Schweden und der Schweiz je eine Pilotanlage realisiert. Neuere Untersuchungen (HORNBAECHNER ET AL. 2005) geben europaweit fünf Anlagen an, die mit dieser Technik ausgestattet sind. An der TU Wien läuft derzeit ein Pilotprojekt mit dem Ziel, Biomethan (= Erdgasersatz) nach Vorgaben der ÖVGW RL G31 mit einer neu entwickelten Biogasaufbereitung auf der Basis einer zweistufigen Gaspermeation aus einer Energiepflanzenvergärung zu produzieren (HARASEK 2006).

Methananreicherung durch CO₂-Verflüssigung

Bei der Gasverflüssigung, auch Kyrotrennung (oder Tieftemperaturtrennung) genannt, handelt es sich um ein vor der Erprobung stehendes Verfahren zur Methangewinnung aus Biogas für die Kraftstoffherstellung (SCHULZ ET AL. 2003). Tieftemperaturverfahren beruhen darauf, dass Kohlendioxid bei -78,5°C sublimiert, wohingegen Methan gasförmig bleibt (WEILAND 2003a).

Nach Verdichtung auf einen Eingangsdruck von etwa 200 bar werden die Gasbegleitstoffe (H₂S usw.) an Molekularsieben adsorbiert. Anschließend wird das verflüssigte Gasgemisch mittels Niedertemperaturdestillation bei etwa 30 bar aufgetrennt. Die Abkühlung bewirkt hierbei eine entsprechende Verminderung des Drucks. Das Verfahren nutzt die unterschiedlichen Siedepunkte von Methan, das bei 50 bar und unter -80°C flüssig wird, und von Kohlendioxid, das bei +15°C flüssig wird (SCHULZ ET AL. 2003).

Kohlendioxid und etwa 80 % des CH₄ werden flüssig abgezogen, 20 % des Methans liegen gasförmig vor. Das flüssige Methan wird bei -161°C unter Normaldruck und das CO₂ in Druckbehältern bei 20 bar und Umgebungstemperatur gelagert. Die Funktionsweise des Verfahrens wurde in Laborversuchen bestätigt, bislang aber noch nicht in größerem Maßstab für die Biogasaufbereitung erprobt (SCHULZ ET AL. 2003).

Nach WEILAND (2003a) liegt der Vorteil dieses Verfahrens in der Gewinnung von hochreinem Methan, was durch die Phasentrennung möglich wird, da auch andere Verunreinigungen wie beispielsweise Siloxane mit dem verflüssigten Kohlendioxid abgetrennt werden. Nach SCHULZ ET AL. (2003) liegt der Vorteil der Gasverflüssigung ebenfalls in einem hohen Reinheitsgrad des aufbereiteten Gases. Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist das Verfahren aber sehr kostenintensiv und es wurde nach Angaben von HORNBAECHNER ET AL. (2005) auch noch keine Anlage im Realbetrieb errichtet.

5.8.2.4 Fazit

Nach HARASEK (2006) gibt es keinen a-priori Technologiefavoriten in der Biogasaufbereitungstechnik. Die Entscheidung, welches Aufbereitungsverfahren in den Biogasanlagen zur Anwendung kommt, ist abhängig von:

- der geforderten Gasreinheit bzw. Gasqualität
- der Anlagenkapazität
- der erforderlichen Betriebsweise
- den Druckverhältnissen
- den bereitstellbaren Betriebsmitteln

- der Integrierbarkeit in das Gesamtkonzept der Biogasanlage
- den Kosten

5.8.3 Leitfaden zur energetischen Nutzung von Biogas

5.8.3.1 Nutzungsweg 1 (Heizkessel, Motor-BHKW, Mikrogasturbine und Stirlingmotor)

Biogasnutzung durch Heizkessel

Die einfachste Form der Nutzung ist die direkte Verbrennung des Biogases in Heizkesseln zur Wärmeerzeugung. Jahrzehntlang war die Wärmegewinnung aus Biogas nahezu die einzige technische Möglichkeit der Biogasverwertung (GRAF 2002).

Das Biogas kann bei entsprechenden Brennern auch anderen Brennstoffen zugefeuert werden. Heutzutage ist die Nutzung von Biogas zur reinen Wärmeerzeugung nicht mehr weit verbreitet und hat gegenüber der Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken an Bedeutung verloren. Dies kann sich im Zuge der Entwicklung von Wärmenutzungskonzepten, in denen der Abstand zwischen Biogasanlage und Verbraucher für eine Wärmeleitung zu groß, aber die Versorgung direkt mit Biogas ohne Energieverlust wirtschaftlich ist, ändern (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Beim Heizen mit Biogas werden Biogasbrenner ohne Gebläse (atmosphärische Brenner) und Biogasbrenner mit Gebläse unterschieden (SCHULZ 2001).

Biogasbrenner ohne Gebläse

Biogasbrenner ohne Gebläse werden auch als atmosphärische Brenner bezeichnet, da sie die Verbrennungsluft aus der Umgebung beziehen (GRAF 2002). Die atmosphärischen Geräte für die Warmwasserheizung bestehen in der Regel aus einem Brenner, der die Verbrennungsluft durch Selbstansaugung aus der Umgebung bezieht, und einem Wärmetauscher. Die Zündung erfolgt bei kleinen Geräten über eine dauerhaft brennende Zündflamme. Diese Geräte erfordern geringen Platzbedarf, weisen einen geräuscharmen Betrieb auf und sind günstig in der Anschaffung (WELLINGER ET AL. 1984).

Biogasbrenner ohne Gebläse benötigen einen Gasvordruck von rund 7–9 mbar. Bei den heute vorwiegend verwendeten Foliengasspeichern liegt für Biogasbrenner ein zu geringer Gasdruck vor, weshalb ein Verdichter mit Druckregler erforderlich ist (SCHULZ 2001, GRAF 2002).

Am häufigsten werden Biogasbrenner ohne Gebläse als Gasspezialkessel mit einer Leistung von 10–30 kW, als Durchflusserhitzer im Leistungsbereich zwischen 5 und 30 kW und als Gasboiler eingesetzt. Zusätzlich kann Biogas auch für Kochherde und Gasheizstrahler bei der Raumheizung verwendet werden (WELLINGER ET AL. 1984).

Biogasbrenner mit Gebläse

Bei Biogasbrennern mit Gebläse wird die Verbrennungsluft durch einen Ventilator, dessen Fördermenge über eine Klappe genau zudosiert werden kann, dem Brennerkopf zugeführt (WELLINGER ET AL. 1984). Gebläsebrenner sind ab einer Leistung von 10 kW erhältlich. Die Kesselwirkungsgrade moderner Geräte liegen durchschnittlich bei 80–83 % (GRAF 2002).

Gebläsebrenner benötigen einen Gasvordruck von mindestens 15 mbar. In den vorwiegend zum Einsatz kommenden Niederdruck-Foliengasspeichern liegt für Biogasbrenner ein zu gerin-

ger Gasdruck vor, weshalb ein Verdichter mit Druckregler erforderlich ist (SCHULZ 2001, GRAF 2002).

Biogasnutzung durch Kraft-Wärme-Kopplung (ohne Brennstoffzelle)

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die gleichzeitige Erzeugung von Kraft (bzw. Strom) und Wärme verstanden. Die breiteste Anwendung dieser Technologie finden Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren, die mit einem Generator gekoppelt sind. Die Motoren laufen mit konstanter Drehzahl (1500 U min^{-1}), damit der direkt gekoppelte Generator elektrische Energie, die kompatibel zur Netzfrequenz ist, bereitstellt. Zum Generatorantrieb bzw. zur Stromerzeugung können alternativ zu den üblichen Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren, Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Brennstoffzellen benötigen einen eigenen Weg der Aufbereitung in Reformern, weshalb dieses Verfahren im Kapitel 5.9.3.3. getrennt dargestellt wird.

Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren

Die kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken (im weiteren Text BHKW) stellt die Mehrzahl der Anwendungen in der Biogasnutzung dar. Das BHKW-Modul besteht neben dem Verbrennungsmotor und einem darauf abgestimmten Generator aus Wärmetauschersystemen zur Rückgewinnung der Wärmeenergie aus Abgas, Kühlwasser- und Schmierölkreislauf, hydraulischen Einrichtungen zur Wärmeverteilung und elektrischen Schalt- und Steuereinrichtungen zur Stromverteilung und zur BHKW-Steuerung (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden drei Arten von Verbrennungsmotoren Gas-Ottomotoren, Gas-Dieselmotoren und Zündstrahlmotoren eingesetzt (DICHTL 1997). Gas-Ottomotoren und Gas-Dieselmotoren (Gasmotoren auf der Basis eines umgerüsteten marktüblichen Dieselmotorblocks) werden nach dem Ottoprinzip ohne zusätzliches Zündöl betrieben, der Unterschied liegt lediglich in der Verdichtung. Beide Motoren werden daher im weiteren Text als Gas-Ottomotoren bezeichnet.

Entscheidend beim Einsatz von Verbrennungsmotoren ist die Optimierung der Wirtschaftlichkeit. Dafür sind hohe elektrische Wirkungsgrade und eine lange Lebensdauer der verwendeten Aggregate anzustreben. Hohe elektrische Wirkungsgrade bewirken eine größere Unabhängigkeit von der Wärmeverwertung, die vor allem in Sommermonaten für viele Betriebe problematisch ist (SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004). WALLA (2006), der 64 Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung zwischen 29 bis 2425 kW untersuchte, konnte aufzeigen, dass der elektrische Wirkungsgrad in Abhängigkeit zur elektrischen Leistung der Biogasanlage ansteigt. Biogasanlagen in der Kategorie $\leq 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ besaßen einen durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 31 %, wohingegen Biogasanlagen in der Kategorie $> 1000 \text{ kW}_{\text{el}}$ einen durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 41 % aufwiesen.

Einen weiteren entscheidenden Faktor beim Einsatz von Verbrennungsmotoren stellt die Einhaltung des Grenzwerts für NO_x -Emissionen dar. Zur Einhaltung des Grenzwerts muss das Luftkraftstoffverhältnis λ exakt eingestellt werden (SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004). In Tabelle 92 werden die NO_x -Grenzwerte entsprechend der TA-Luft für Gas- und Dieselmotoren dargestellt.

Tabelle 92. NO_x-Grenzwerte entsprechend der TA-Luft für Gas- und Zündstrahlmotoren (nach SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004)

| Verbrennungsmotorentyp | NO _x -Grenzwerte (mg m ⁻³) |
|--|---|
| Gasmotoren | |
| Magermotoren | 500 |
| Sonstige 4-Takt-Motoren | 250 |
| Zündstrahlmotoren für Bio-/Klärgas (>3 MW Feuerungswärmeleistung) | 500 |
| Zündstrahlmotoren für Bio-/Klärgas (<3 MW Feuerungswärmeleistung) | 1000 |
| Zündstrahlmotoren | |
| Selbstzündermotoren >3 MW | 500 |
| Selbstzündermotoren <3 MW | 1000 |

Nach Untersuchungen von WEILAND ET AL. (2004a) werden unterhalb einer elektrischen Leistung von ca. 200 kW fast ausschließlich Zündstrahlmotoren eingesetzt, während bei größeren Leistungen Gasmotoren dominieren. Gemäß der Leistungsverteilung finden bei ca. 70 % der Anlagen Zündstrahlmotoren und bei ca. 30 % der Anlagen Gasmotoren Anwendung.

Gas-Ottomotoren

Gas-Ottomotoren sind speziell für den Gasbetrieb entwickelte Motoren, die nach dem Ottoprinzip arbeiten. Der Gas-Ottomotor ist aus heutiger Sicht für den Einsatz mit Biogas sehr weit entwickelt (HERDIN 2003). Nach Herstellerangaben können speziell für den Biogasbetrieb entwickelte Gas-Ottomotoren 40.000-60.000 Betriebsstunden erreichen. Für die Betriebsstundenzahl bestimmende Faktoren sind die Biogasqualität sowie die Wartung der Anlage (SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004).

Gas-Ottomotoren eignen sich für alle Biogasanlagen und können vor allem in größeren Anlagen sehr wirtschaftlich betrieben werden. In kleineren Anlagen werden hauptsächlich einzeln stehende Aggregate in einem Gebäude aufgestellt. Für größere Anlagen wird meistens eine Kompaktbauweise in Containern vorgezogen (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Gas-Ottomotoren weisen einen geringen Wartungsaufwand auf und halten die Emissionsgrenzwerte sicher ein. In Tabelle 93 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile von Gas-Ottomotoren mit Biogasbetrieb angeführt.

Tabelle 93. Vor- und Nachteile von Gas-Ottomotoren mit Biogasbetrieb (nach SCHOLWIN ET AL. 2004a, MITTERLEITNER 2002)

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| + speziell für die Gasverwertung konstruiert | - leicht erhöhte Kosten gegenüber Zündstrahlmotoren |
| + Emissionsgrenzwerte werden sicher eingehalten | - höhere Kosten durch Fertigung in geringen Stückzahlen |
| + geringer Wartungsaufwand | - im unteren Leistungsbereich geringerer elektrischer Wirkungsgrad als bei Zündstrahlmotoren |
| + Gesamtwirkungsgrad höher als bei Zündstrahlmotoren | - Motoren sind auf einen Mindestmethangehalt von ca. 40 % angewiesen |
| + Standzeiten der Motoren sind höher als bei Zündstrahlmotoren | |
| + mit Gasmotoren kann auf den Einsatz fossiler Energie verzichtet werden | |

Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Verbrennung von Biogas in Gas-Ottomotoren sieht KRAUTKREMER (2003b) in der Sicherung der Abgasqualität bei schwankender Produktgaszusammensetzung. Entscheidend sei die Entwicklung von Regelstrategien zur Brennwertanpassung bzw. zur Klopfestigkeitsüberwachung.

Zündstrahlmotoren

Zündstrahlmotoren arbeiten nach dem Dieselpinzip. Früher wurden häufig Dieselmotoren aus dem Schlepper- und Lastkraftwagenbau modifiziert. Sie sind nicht immer speziell für den Gasbetrieb entwickelt und werden teilweise durch Modifizierungen an den Gasbetrieb angepasst (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Zündstrahlmotoren eignen sich wie Gas-Ottomotoren für alle Biogasanlagen und können vor allem in größeren Anlagen sehr wirtschaftlich betrieben werden. In kleineren Anlagen werden hauptsächlich einzeln stehende Aggregate in einem Gebäude aufgestellt. Für größere Anlagen wird meistens eine Kompaktbauweise in Containern vorgezogen (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Zündstrahlmotoren haben im Gegensatz zu Gas-Ottomotoren weniger Probleme bei schwankenden Methangehalten im Biogas. Sie gleichen dies mit dem Einsatz von mehr oder weniger Zündöl aus (SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004). In Tabelle 94 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile von Zündstrahl-Motoren mit Biogasbetrieb angeführt.

Tabelle 94. Vor- und Nachteile von Zündstrahl-Motoren mit Biogasbetrieb (nach SCHOLWIN ET AL. 2004A, MITTERLEITNER 2002, SIMON & SCHWANHÄUßLER 2004)

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| + preisgünstiger Einsatz von Standardmotoren | - keine für Biogas spezifische Entwicklung der Motoren |
| + im unteren Leistungsbereich erhöhter elektrischer Wirkungsgrad im Vergleich zu Gas-Ottomotoren | - Gesamtwirkungsgrad geringer als bei Gas-Ottomotoren |
| + Zündstrahler können auch ausschließlich mit Zündöl betrieben werden | - es muss ein zusätzlicher Brennstoff (Zündöl) eingesetzt werden |
| + die Motoren haben bei schwankenden Methangehalten im Biogas weniger Probleme | - Verkoken der Einspritzdüsen führt zu erhöhten Abgasbelastungen (NOX) und häufigeren Wartungsarbeiten |
| | - der Schadstoffausstoß überschreitet häufig die in der TA-Luft vorgegebenen Grenzwerte |

Biogasnutzung mit Mikrogasturbinen

Der Einsatz einer Mikrogasturbine stellt eine interessante Alternative zur konventionellen motorischen Biogasnutzung im Leistungsbereich unterhalb von 200 kW elektrische Gesamtleistung dar (WILLENBRINK 2002). In Gasturbinen wird Luft aus der Umgebung angesaugt und durch einen Verdichter auf hohen Druck verdichtet. Die Luft gelangt in eine Brennkammer, wo sie gemeinsam mit dem Biogas verbrannt wird. Die dabei stattfindende Temperaturerhöhung bewirkt eine Volumenausdehnung. Die heißen Gase gelangen in eine Turbine, wo sie entspannt werden, wobei sie deutlich mehr Leistung abgeben als für den Antrieb des Verdichters benötigt wird. Mit der nicht zum Verdichterantrieb benötigten Energie wird ein Generator zum Zweck der Stromerzeugung angetrieben (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Als Mikrogasturbine werden in der Regel kleine, schnelllaufende Gasturbinen mit niedrigen Brennkammerdrücken und Brennkammertemperaturen im Leistungsbereich bis etwa 200 kW_{el}

bezeichnet (DIELMANN 2000). Die Mikroturbinen entstanden aus der Turboladertechnologie und der Entwicklung in der Luftfahrtindustrie. Der Strom wird über einen schnelllaufenden Permanentmagnetgenerator erzeugt, der ohne Zwischenschaltung eines mechanischen Getriebes auf derselben Welle angebracht ist.

Als Brennstoff kamen bisher vorwiegend standardisierte Energieträger wie Heizöl und Erdgas zum Einsatz. Für den Erdgaseinsatz sind Mikrogasturbinen seit Ende der 90er Jahre verfügbar. Erste Anwendungen im Deponie- bzw. Biogasbereich sind in den Jahren 2001 und 2002 erfolgreich realisiert worden (WILLENBRINK 2002).

Zurzeit werden am Markt Mikrogasturbinen von verschiedenen Herstellern aus den USA (Capstone, Elliott, Honeywell Power Systems, NREC) im Leistungsbereich von 28 kW_{el.} bis 80 kW_{el.} angeboten. Darüber hinaus bietet die deutsche Firma Pro2 ein europäisches Produkt an. Das Modul LTC 100 hat im Biogasbetrieb bei einem Brennstoffbedarf von 316 kW (entspricht ca. 50 m³ Biogas pro Stunde) eine Leistung von 95 kW_{el.} und eine thermische Leistung von 141 kW (WILLENBRINK 2002).

Unerwünschte Begleitstoffe im Biogas können die Mikrogasturbinen schädigen, weshalb eine Gasreinigung und -trocknung durchgeführt werden muss. Mikrogasturbinen können Methangehalte von 35 bis 100 % verkraften (DIELMANN 2001, DIELMANN & KRAUTKREMER 2002). Siloxane bereiten auch bei Mikrogasturbinen erhebliche Schwierigkeiten (KRAUTKREMER 2003a).

Trotz ihrer hohen Leistungsfähigkeit arbeiten die Mikrogasturbinen außergewöhnlich umweltschonend. Sie entwickeln nur einen Bruchteil der Schall- und Schadstoffemissionen konventioneller Technologien in diesem Leistungsbereich. Vorteile gegenüber dem Konkurrenten bestehen im niedrigeren Wartungsaufwand (Einwellenanlage, Luftlager, kein Getriebe, minimale Anzahl beweglicher Teile) und besseren Emissionswerten bei vergleichbaren spezifischen Investitionen und Wirkungsgraden (ARLT 2000). In Tabelle 95 werden die Vor- und Nachteile der Biogasnutzung in Mikrogasturbinen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 95. Vor- und Nachteile von Mikrogasturbinen mit Biogasbetrieb (DIELMANN 2001, ARLT 2000, WILLENBRINK 2002)

| Vorteile | Nachteile |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> + sehr niedrige Abgasemissionen aufgrund kontinuierlicher Verbrennung mit hohem Luftüberschuss + niedrige Schallemissionen, da die größte Schalleistung bei 3000–4000 Hz in einem Frequenzbereich weit oberhalb vergleichbarer Bereiche einer Gasmotorenanlage liegt und sich mit einem erheblich geringeren Aufwand dämpfen lässt + schwingungsarmer Betrieb, da nur drehende Bewegungen vorliegen + wartungsarmer Betrieb aufgrund der im Vergleich zu Motoren erheblich geringeren Anzahl bewegter Teile | <ul style="list-style-type: none"> – mit ca. 28 % relativ geringer elektrischer Wirkungsgrad – mit ca. 82 % liegt auch der Gesamtwirkungsgrad häufig etwas unter dem von Gas-Ottomotoren und Zündstrahlmotoren – die Investitionskosten liegen verglichen mit leistungsäquivalenten, auf Motoren basierenden Biogasnutzungskonzepten um 15 bis 20 % höher |

Mikrogasturbinen zeichnen sich vor allem durch günstige Wartungs- und Betriebskosten aus. Zudem bietet der geringe Schadstoffgehalt interessante Möglichkeiten für eine Nutzung des

Abgases zur Pflanzendüngung mit Kohlendioxid im Gartenbau oder zur direkten Trocknung von Futtermitteln (WILLENBRINK 2002).

Zurzeit gibt es eine intensive F&E-Tätigkeit im Bereich von biogasbetriebenen Mikrogasturbinen. Die Investitionskosten liegen verglichen mit leistungsäquivalenten, auf Motoren basierenden Biogasnutzungskonzepten um 15 bis 20 % höher. Es wird allerdings eine Kostensenkung erwartet, wenn Mikrogasturbinen stärker im Markt vertreten sind (DIELMANN 2001).

Biogasnutzung mit Stirlingmotoren

Der Stirlingmotor gehört zu den Heißgas- oder Expansionsmotoren. Das grundlegende Prinzip des Stirlingmotors basiert auf dem Effekt, dass ein Gas bei einer Temperaturänderung eine gewisse Volumenänderungsarbeit verrichtet. Wird dieses Arbeitsgas zwischen einem Raum mit konstant hoher Temperatur und einem Raum mit konstant niedriger Temperatur hin- und herbewegt, ist ein kontinuierlicher Betrieb des Motors möglich. Damit wird das Arbeitsgas im Kreislauf geführt (KALTSCHMITT & HARTMANN 2001).

Um Stirlingmotoren konkurrenzfähig in der Biogastechnologie einsetzen zu können, bedarf es noch diverser technischer Weiterentwicklungen. Der Stirlingmotor würde wie Zündstrahl- oder Gas-Otto-Aggregate in BHKW eingesetzt werden können. Derzeit laufen in Deutschland Versuche mit einem 40-kW-Stirlingmotor, der mit Biogas betrieben wird. In Österreich wurde der Pilotbetrieb eines Stirlingmotors ebenfalls aufgenommen (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

5.8.3.2 Nutzungsweg 2 (Kraftstoff und Netzeinspeisung)

Biogas als Kraftstoff

Die Herstellung von Kraftstoffen aus Biogas kann auf verschiedene Weise geschehen, denn aus Biogas lassen sich sowohl gasförmige als auch flüssige Energieträger herstellen. Die Qualität des eingesetzten Biogases bestimmt nicht nur die Qualität des Endprodukts, sondern auch die Standzeit empfindlicher Teile wie Katalysatoren und Reformer in der Herstellung selbst (REHER 2003).

Kennzeichen

Die Herstellung des Erdgassubstituts „Greengas“ bzw. Biomethan aus Biomethankraftwerken für die Nutzung als Kraftstoff in Fahrzeugen ist bereits Stand der Technik. Biogas muss auf eine für den Einsatz in derzeit üblichen Kfz-Motoren akzeptable Qualität aufbereitet werden. Neben den auf den Motor korrosiv wirkenden Stoffen wie z.B. Schwefelwasserstoff muss auch der Kohlendioxidanteil sowie Wasserdampf aus dem Biogas entfernt werden. Da es sich bei den angebotenen Fahrzeugen meist um Erdgasfahrzeuge handelt, ist eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität notwendig (ÖVGW RL G31, siehe Tabelle 81). Nach JÖNSSON & PERSSON (2003) stellen Gaswäscher und die PSA-Technologie die am meisten zum Einsatz kommenden Verfahren zur Gasaufbereitung in Schweden dar. Auch in Österreich ist die biologische Entschwefelung im Fermenter die derzeit vorherrschende Technik (HORNBACHNER ET AL. 2005). Im Bereich der Methananreicherung wird die Druckwasserwäsche (DWW) aber noch häufiger eingesetzt als die Technik der Druckwechseladsorption mit Kohlenstoffmolekularsieb (PSA).

Gasbetriebene Fahrzeuge sind derzeit am Markt verfügbar und werden von allen namhaften Kfz-Herstellern angeboten. Das Angebot erstreckt sich auf Modelle mit monovalenter oder

bivalenter Betriebsweise. Monovalente Fahrzeuge werden nur mit Gas betrieben. Bei bivalenter Betriebsweise kann der Motor mit Gas oder wahlweise mit Benzin angetrieben werden. Mit unkomprimiertem Biogas ist wegen der beträchtlichen Volumina keine nennenswerte Reichweite zu erzielen. Aus diesem Grund wird das Biogas in Druckgasbehältern bei ungefähr 200 bar im Heck der Fahrzeuge gespeichert (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Bei der Verwendung des Biomethans als Fahrzeugtreibstoff kann das aufbereitete Biogas entweder in Druckgasflaschen abgefüllt oder in das Erdgasnetz eingespeist werden. Für die Speicherung und den Transport in Druckgasflaschen muss das Biomethan auf 250–300 bar nachverdichtet werden (SCHULTE-SCHULZE BERND 2001). Die Druckgasflaschenbündel werden zu einer Erdgastankstelle transportiert, wodurch Zusatzkosten und CO₂-Emissionen sowie Gefahren beim Transport und Handling der Druckgasflaschen entstehen.

Die Netzeinspeisung stellt nach SCHULTE-SCHULZE BERND (2001) die sinnvollere Variante der Biogasnutzung dar. Die Netzeinspeisung führt über eine Einspeisestation, in der die Qualitätsüberwachung, die Dokumentation und Mengenerfassung untergebracht sind. Das aufbereitete Biogas kann an jeder beliebigen Stelle beispielsweise durch eine Erdgastankstelle dem Netz entnommen werden.

Die Vorteile der mit aufbereitetem Biogas betriebenen Fahrzeuge sind die gleichen wie bei Erdgas betriebenen Fahrzeugen (nach SCHULTE-SCHULZE BERNDT 2001):

- Deutlich weniger CO-, SO₂- und NO_x-Emissionen im Vergleich zu Benzinfahrzeugen
- Geringer Partikelaustritt
- Keine Geruchsbelästigung
- Geringe Motorlärmentwicklung
- Hoher Motorwirkungsgrad
- Geringe spezifische Kraftstoffkosten im Vergleich zu Diesel- (~40 %) und Benzinfahrzeugen (~60 %)
- Nahezu 100 %-ige CO₂-Neutralität

Erdgas bzw. Erdgassubstitut ist nachweislich der emissionsärmste Kraftstoff.

Die Wasserstoffproduktion aus Biogas befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase. Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen bzw. Methanol aus Biogas könnte künftig ebenfalls eine Alternative zur Nutzung von Biogas sein (REHER 2003).

Rechtliche Rahmenbedingungen

Die gesetzliche Grundlage für den Biotreibstoffeinsatz liefert die EU-Treibstoffrichtlinie. Demnach muss Österreich bis 2005 2 % und bis 2010 5,75 % Biotreibstoffe einsetzen. Experten der steirischen Landwirtschaftskammer haben ein umsetzungsreifes Biogastreibstoffkonzept entwickelt. Dieses sieht österreichweit die Produktion von 400 Mio. m³ Biogastreibstoff aus 400 landwirtschaftlichen Biogasanlagen vor. Damit könnten 375.000 PKWs oder 37.000 LKWs und Busse – knapp 10 % der derzeit zugelassenen Fahrzeuge – betrieben werden (PLANK 2004). Dieses Konzept sieht ferner die Errichtung von 400 Biogastankstellen vor.

Nach PLANK (2004) sind zur Umsetzung dieses Biogastreibstoffkonzepts noch gesetzliche Rahmenbedingungen notwendig wie die garantierte Steuerbefreiung für Biokraftstoff für min-

destens 15 Jahre, Normverbrauchsabgabe (NOVA) und KFZ-Steuerbefreiung für biokraftstoffbetriebene Autos und den bevorzugten Einsatz von Biogasfahrzeugen während Immissionswetterlagen, weil Biogasfahrzeuge praktisch keine Feinstaubpartikel emittieren. In Deutschland wurde im Juni 2002 eine 20-jährige Steuerbefreiung für Biokraftstoffe fixiert.

In Schweden und der Schweiz wird Biogas schon seit längerer Zeit als Treibstoff für Busse und Lastkraftwagen eingesetzt. Auch in Deutschland wurden mehrere Projekte durchgeführt, eine breite Umsetzung hat die Technologie dort allerdings noch nicht gefunden.

2003 haben Deutschland und die Schweiz die Absicht bekundet, ein flächendeckendes Netz von Erdgastankstellen, d.h. 1000 bzw. 100 öffentliche Anlagen, zu bauen und zu betreiben (FERNANDEZ 2003).

In Schweden kann Biogastreibstoff in unbeschränkter Menge steuerfrei verwendet werden, in der Schweiz erlaubt der Gesetzgeber die Verwendung nur in Pilot- und Demonstrationsanwendungen. Er begrenzt zudem die Gesamtmenge auf 5 Millionen Liter Dieseläquivalent, um den Demonstrationscharakter zu unterstreichen. Das Schweizer Parlament hat allerdings die Weichen für eine generelle Verwendung von Biogas als Treibstoff gestellt. Damit würden einer weiteren Verbreitung dieser erneuerbaren Energie im Verkehr keine großen Hindernisse mehr im Wege stehen (FERNANDEZ 2003).

Ökonomische Aspekte

Nach WEILAND (2002) sind die Kosten für die Aufbereitung des Biogases, die vom angestrebten Reinheitsgrad abhängen, schwer abzuschätzen. Wegen des erforderlichen Technikaufwandes und der zu erwartenden Investitionskosten eignen sich hierfür vor allem Anlagen mit einer Biogasproduktion von mindestens 2.500 m³ pro Tag.

JÖNSSON & PERSSON (2003) haben in einer Studie die Aufbereitungskosten anhand von 11 schwedischen Anlagen ermittelt. Für kleine Biogasanlagen mit einer Rohbiogasproduktion von <100 m³ h⁻¹ geben sie Aufbereitungskosten von 3–4 Eurocent pro kWh Biogas an. Für größere Anlagen mit 200–300 m³ Rohbiogas pro Stunde ermittelten sie Aufbereitungskosten von 1–1,5 Eurocent pro kWh Biogas. Für österreichische Biogasanlagen gibt die Studie von HORNBACHER ET AL. (2005) eine detaillierte Aufstellung der Kosten für die verschiedenen Aufbereitungsverfahren. Sie geben durchschnittlichen Aufbereitungskosten von 2,5 Eurocent pro kWh Biogas an.

Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz

Die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz könnte zukünftig einen weiteren Nutzungsweg darstellen. Biogas würde nicht mehr vor Ort in BHKW zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt, sondern direkt in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Hierfür ist es allerdings notwendig, noch bestehende rechtliche Hemmnisse und technisch-wirtschaftliche Barrieren zu überwinden (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Kennzeichen

Biogas kann nur ins Erdgasnetz eingespeist werden, wenn es auf Erdgasniveau aufbereitet wird. Biogas muss soweit aufbereitet werden, dass es kompatibel mit Erdgas in den Gasleitungen ist.

Um die geforderten Kennwerte zu erreichen, muss das Biogas getrocknet und von Schwefelwasserstoff befreit werden. Des Weiteren ist eine Trennung von Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) durchzuführen. Neben der eigentlichen Aufbereitung ist eine Druckerhöhung des einzuspeisenden Gases auf den vorherrschenden Druck in der Erdgasleitung vorzunehmen. Außerdem muss der Transport des Biogases über Leitungen zur eigentlichen Einspeisestelle sichergestellt sein (SCHULZ ET AL. 2003).

Nach FRIEDRICH (2003) sind selbst bei Einhaltung der technischen Vorgaben aufgrund des höheren CO_2 -Gehalts im Mischgas Schwierigkeiten in der Gasverwendung nicht ausgeschlossen. Die Durchführung gezielter F&E-Vorhaben im Bereich der Einspeisung befindet FRIEDRICH (2003) als sinnvoll. In Österreich werden derzeit in der Programmlinie „Energiesysteme der Zukunft“ des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie vier F&E-Studien zu diesem Thema finanziert.

An der Konfiguration der Biogasanlage ändert sich bei der Einspeisung des Biogases bis auf den Wegfall des BHKW nichts. Durch das fehlende BHKW müssten Alternativen bei der Bereitstellung von Prozessstrom und -wärme berücksichtigt werden. Der Prozessstrom kann aus dem Netz entnommen, die Beheizung des Fermenters könnte beispielsweise über Heizkessel realisiert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre der parallele Betrieb eines BHKW, das so ausgelegt ist, dass die benötigte Prozessenergie zur Verfügung gestellt werden kann. Das verbleibende Biogas würde zur Einspeisung in das Erdgasnetz genutzt werden können (SCHOLWIN ET AL. 2004a).

Entscheidend bei der Einspeisung von Biogas als Zusatzgas in das Erdgasnetz ist das richtige Druckverhältnis, mit dem die Übergabe in das Erdgasnetz erfolgt (STRICKER 2003). Aufbereitetes Biogas steht mit ca. 6 bar zur Verfügung. Eine Einspeisung ins Erdgasnetz kann nach STRICKER (2003) unter folgenden Druckverhältnissen erfolgen:

- a) Im Verteilungsnetz, welches in der Regel odorisiertes Gas enthält, sind drei Druckstufen zu unterscheiden:
 1. Niederdruck-Erdgasnetz (<100 mbar), die Druckanpassung erfolgt über Druckregelung
 2. Mitteldruck-Erdgasnetz (≥ 100 mbar, <1 bar), die Druckanpassung erfolgt über Druckregelung
 3. Hochdruck-Erdgasnetz (≥ 1 bar, <25 bar), die Druckanpassung erfolgt über Druckregelung oder Verdichtung
- b) Im Transportnetz, welches in der Regel nicht odorisiertes Gas enthält und normalerweise mit mehr als 16 bar betrieben wird, ist die Einspeisung von Biogas nur über eine Druckerhöhung möglich.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Aus rechtlicher Sicht schreibt eine EU-Gasrichtlinie den ungehinderten Zugang zum Gasnetz für jeden Gaslieferanten vor (Richtlinie zur Öffnung der Gasnetze für Biogase und Gas aus Biomasse; Europäisches Parlament; 13.03.2001). Weitere rechtliche Rahmenbedingungen liefert das Gaswirtschaftsgesetz mit dem Energieliberalisierungsgesetz (Bgb. 121/2000; Artikel 1 – GWG) und der Novelle (Bgb. 148/2002). Zu beachten sind nach GIKOPOULOS (2003) auch allgemeine Netzbedingungen und sonstige Marktregeln (E-Control, Version 2 – Juli 2003). Die Qualität des einzuspeisenden Gases wird in Österreich durch die ÖVGW Richtlinie G31 „Gas-

beschaffenheit“ geregelt (GIKOPOULOS 2003). Nach Einschätzung von HORNBACHNER ET AL. (2005) sind die derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich für Biogas sehr ungünstig, da sie historisch bedingt für Erdgas optimiert wurden. Demnach ergeben sich für Biogas bei der Netzeinspeisung erhebliche, weitgehend unnötige Zusatzkosten, die nach Auffassung der Autoren aber durch bessere rechtliche Voraussetzungen vermieden werden können.

Ökonomische Aspekte

Nach SCHULZ ET AL. (2003) lohnt sich die Einspeisung von Biogas in das öffentliche Gasversorgungsnetz heute noch nicht, weil meist günstigere Nutzungsalternativen existieren. Unter wirtschaftlichen Kriterien käme beispielsweise die Beheizung anderer Betriebsteile oder eine Fortleitung des lediglich entschwefelten Biogases zur Versorgung eines externen Wärmegroßverbrauchers, der auf der Basis eines BHKW die Einspeisevergütung für Strom aus regenerativen Quellen ausnutzen oder höhere Strombezugskosten verdrängen kann, eher in Betracht.

Das hohe Kostenniveau ist nach SCHULZ ET AL. (2003) aber auch darauf zurückzuführen, dass sich gegenwärtig aufgrund der geringen Zahl realisierter Anlagen (die oft mit öffentlichen Mitteln gefördert worden sind) keine echten Marktverhältnisse herausgebildet haben. Für Bereiche, in denen die Gaserzeugung nur zum Teil oder überhaupt nicht der Energieerzeugung angelastet werden muss (z.B. bei der Abwasser- oder Abfallbehandlung), könnte sich aber bereits auf der Basis der vorgelegten Angebote eine interessante Option ergeben.

In der Praxis existieren Biogaseinspeiseanlagen in Schweden, den Niederlanden und der Schweiz. In Deutschland wird gerade an den ersten Anlagen gearbeitet, wobei bisher noch keine Standardtechnik für die Umsetzung der Aufbereitungsschritte angeboten wird. Darüber hinaus gibt es noch erhebliche Probleme bei der ökonomischen Umsetzung derartiger Anlagen.

In Österreich ergeben sich nach Angaben von BERGMAYER (2006) für größere Biogasanlagen Austauschgas-Gestehungskosten, die zwischen 50 und 55 Eurocent pro Nm³ liegen würden. Die spezifischen Kosten für die Biogasaufbereitung steigen bei kleinen Anlagen unter 150 Nm³ h⁻¹ aber stark an. Auch die Kosten der Biogas-Netzeinspeisung liegen für kleinere Anlagen höher (HORNBACHNER ET AL. 2005). Die Gegenüberstellung der Gestehungskosten der Biogaseinspeisung mit den derzeitigen Erdgaspreisen zeigte, dass die Gestehungskosten von Biogas zum Teil deutlich über den Importpreisen von Erdgas liegen (HORNBACHNER ET AL. 2005). Je nach Anlagengröße, Rohstoffquelle und Aufbereitungsverfahren liegen die Gesamtkosten demnach beim 1,3- bis 6,6-fachen des Importpreises für Erdgas. Bei ihrer Einschätzung der rechtlichen, wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die Biogas-Netzeinspeisung in Österreich geben HORNBACHNER ET AL. (2006) daher folgende Empfehlungen hinsichtlich Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Realisierbarkeit:

- neue Richtlinie über die Gasqualität (Qualität im Netz bzw. bei Entnahme entscheidend)
- kostengerechte, entfernungsabhängige Systemnutzungstarife für Biogas
- Ökogasgesetz mit entsprechenden Förderbestimmungen und Quotenzielen für Biogas
- Befreiung des Biogases von der Erdgasabgabe bzw. Mineralölsteuer
- Kennzeichnungspflicht für Gas

5.8.3.3 Nutzungsweg 3 (Reformer/Brennstoffzellen)

Die Nutzung von Gasen aus Biomasse in Brennstoffzellen ist eine zukunftssträchtige Option. Da diese Technologie nicht nur extrem effektiv, sondern aufgrund der geringen Schadstoffemissionen auch sehr umweltfreundlich arbeitet, zählt sie zu den zukunftsweisenden Schlüsseltechnologien. Der Einsatz von Brennstoffzellen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen ermöglicht eine noch rationellere Energieerzeugung bei nachhaltiger Ressourcennutzung.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Geräte, die in der Lage sind, die in einem Brenngas enthaltene chemische Energie durch kontrollierte elektrochemische Reaktionen in elektrische Energie umzuwandeln. Brennstoffzellen gleichen im Aufbau herkömmlichen Batterien, die als Hauptelemente zwei durch einen Elektrolyten getrennte Elektroden (Anode und Kathode) besitzen (OTT & TAMM 2003).

In der Summe läuft bei Brennstoffzellen die gleiche chemische Reaktion ab wie bei einer Verbrennung des Gases im Motor. Jedoch sind Oxidation und Reduktion räumlich getrennt, so dass die beteiligten Elektronen über einen externen elektrischen Verbraucher geleitet werden können (OTT & TAMM 2003). Brennstoffzellen wandeln chemisch gebundene Energie (z.B. Wasserstoff oder Methan (Biogas)) direkt in elektrische Energie und Wärme um, wodurch im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren der Umweg über thermische und mechanische Energie vermieden wird. Brennstoffzellen erreichen dadurch hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 50 % (SCHOLWIN ET AL. 2004a). Zusätzlich wird durch die räumliche Trennung von Brennstoff und Oxidationsmittel die Entstehung von Schadstoffen wie z.B. Stickoxiden prinzipiell verhindert und eine nahezu emissionsfreie Betriebsweise ermöglicht (OTT & TAMM 2003).

Die Wirkungsweise der Brennstoffzelle unterscheidet sich somit grundsätzlich von den herkömmlichen Arten der Energieumwandlung. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren ist das elektrochemische Energiewandlungsprinzip der Brennstoffzellen nicht an den Carnot-Wirkungsgrad gebunden (WENDT & PLZAK 1992).

Für alle Brennstoffzellentypen sind die Investitionskosten von 12.000 € kW⁻¹ sehr hoch und noch weit von motorisch betriebenen BHKW entfernt (WEILAND 2002). Inwieweit sich die Investitionskosten nach unten entwickeln und die noch zum Teil bestehenden technischen Probleme ausgeräumt werden können, wird derzeit in verschiedenen Pilotvorhaben untersucht. Nach SCHOLWIN ET AL. (2004a) ist in den nächsten Jahren aber noch nicht mit marktauglichen Systemen zu rechnen. SIMON & SCHWANHÄUßLER (2004) erklären, dass es notwendig ist, dass die Kosten von Brennstoffzellen auf 1000 € kW⁻¹ reduziert werden. Auch nach ihrer Meinung ist mit wettbewerbsfähigen Produkten aber erst ab dem Jahr 2007 zu rechnen.

6 Ausblick und Empfehlungen

⇒ **Im Energiepflanzenanbau ist die Erforschung standortangepasster Genotypen und optimaler Erntezeitpunkte eine zentrale Komponente und muss auch zukünftig weitergeführt werden.**

Bislang existierten kaum Arbeiten zur Optimierung des Kulturpflanzenanbaus zur Nutzung in Biogasanlagen. Das vorliegende Projekt ist daher sehr wichtig, bestehende Wissenslücken auffüllen zu helfen. Das vorliegende Projekt macht deutlich, dass sich die Nutzungsanforderungen an Energiepflanzen für die Biogaserzeugung grundlegend von denen der Nahrungsmittelherzeugung unterscheiden. Während bei der Nahrungsmittelherzeugung die Qualität bestimmter Pflanzenteile (z.B. Getreidekörner) im Vordergrund steht, ist es bei der Biogaserzeugung die Ganzpflanze. Die vorliegenden Forschungsergebnisse zeigen auf, wie wichtig im Energiepflanzenanbau die Wahl der Sorte und des optimalen Erntezeitpunkts ist, um die bestehenden Potenziale der Energiepflanzen best möglich ausnutzen zu können. Eine hohe Stoff- und Energieproduktivität pro Flächeneinheit kann aber nur erreicht werden, wenn standortangepasste Genotypen für die wichtigen Kulturpflanzenarten bekannt sind. Die Auswahl geeigneter Genotypen richtet sich nach dem spezifischen Methanbildungsvermögen der Biomasse aber auch nach dem Biomassebildungsvermögen, der Wachstumsgeschwindigkeit und der Inhaltstoffzusammensetzung der Biomasse. Im Verlauf der Vegetationsentwicklung der Energiepflanzen verändert sich deren Inhaltstoffzusammensetzung erheblich. Auch das Biomassebildungsvermögen und die Wachstumsgeschwindigkeit sind primär vom Stadium der Vegetationsentwicklung bestimmt. Damit ist die Flächenproduktivität (Methanhektarertrag) der Energiepflanzen direkt und unmittelbar vom gewählten Erntezeitpunkt abhängig.

⇒ **Bestehende Fruchtfolgesysteme müssen an die Produktion von Energiepflanzen angepasst (integrierte Fruchtfolgesysteme) und in Anbauversuchen getestet werden.**

Weiterführend zum vorliegenden Projekt sollten aus anderen Anbauregionen Österreichs standorttypische Fruchtfolgen, die üblicherweise der Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln dienen, Fruchtfolgen für die Energiepflanzenproduktion entwickelt werden. Ziel dieser Weiterentwicklung der Fruchtfolgen ist es, neben einer Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln auch die Bereitstellung von Pflanzen oder Pflanzenteilen als Gärrohstoffe für die Biogaserzeugung zu gewährleisten, d.h. integrierte Fruchtfolgesysteme zu entwickeln. Ein weites Kulturspektrum und verschiedene Anbaustrategien müssen dabei Berücksichtigung finden. Die verwendeten Kulturarten und Anbauintensität müssen dabei den jeweiligen Standortbedingungen angepasst sein und die Bodenfruchtbarkeit der Nutzflächen sichern und erhalten. Düngungskonzepte mit den Gärrückständen der Biogasanlagen sollen bedarfsgerecht und nach fruchtfolgespezifischen Erfordernissen entwickelt werden. Die Methanhektarerträge kompletter, standortangepasster Fruchtfolgesysteme können errechnet werden.

Die für die Biogaserzeugung besonders geeigneten Kulturpflanzenarten Mais, Sonnenblumen, Gräser und kleinkörnige Leguminosen versprechen als spezialisierte Fruchtfolgeelemente in Doppelfrucht- oder Mischkultursystemen eine effiziente Ausnutzung von Wachstumsfaktoren sowie positive Effekte auf die Pflanzengesundheit. Aus diesem Grund würde es sich anbieten, solche Fruchtfolgeelemente für den konventionellen und biologischen Landbau auf typischen Ackerbaustandorten Österreichs in Feldversuchen zu testen.

⇒ **Eine Weiterentwicklung des Methanenergiewertmodells ist dringend notwendig, um die Schätzgenauigkeit und Vorhersagesicherheit zu erhöhen und den Anwendungsbe- reich zu erweitern.**

Dieses im Bereich der Biogasproduktion weltweit einzigartige Bewertungsmodell zur energeti- schen Leistung von Gärrohstoffen wird bereits jetzt auf nationaler und internationaler Ebene sehr stark nachgefragt. Mit Hilfe des Methanenergiewertmodells (MEWM) kann die zu erwar- tende Leistung von Biogasanlagen anhand von Art, Menge und Qualität der Gärrohstoffe a priori bestimmt werden. Das MEWM kann auch dazu verwendet werden, um bei einer ange- strebten Biogasanlagenleistung und gegebenen Gärrohstoffkomponenten die in die Biogasan- lage einzubringenden Gärrohstoffmischungen von ihrer Inhaltsstoffzusammensetzung her op- timal zu gestalten. Durch Anwendung des MEWM kann die Nährstoffversorgung der Mikroor- ganismen optimiert und dadurch maximale Methanausbeuten aus den eingesetzten Gärrohstof- fen erreicht werden. Weiterhin ist es mit dem MEWM möglich, die zu erwartenden Methanhek- tarerträge von Energiepflanzen anhand der Inhaltsstoffzusammensetzung der Gärrohstoffe und der Biomassemenge genau darstellen zu können. Damit kann das MEWM auch als Instrument für Sortenneuzüchtungen eingesetzt werden, was den Züchtungsfortschritt deutlich steigern hilft.

Nach Abschluss des vorliegenden Projekts ist das Methanenergiewertmodell (MEWM) für Mais nun soweit, dass der Methanenergiewert von Mais anhand seiner Inhaltsstoffe mit großer Ge- nauigkeit geschätzt werden kann. Mit der Validierung des Schätzmodells unter praktischen Bedingungen wurde bereits begonnen. Für die Methanenergiewertmodelle für Getreide, Son- nenblumen und Wiesengras hat das vorliegende Projekt erste, wertvolle Daten erbracht. Die Schätzgenauigkeit dieser Modelle ist aber noch nicht ausreichend. Um diese Modelle praxisfä- hrig machen zu können, sind noch weiterführende, systematische Untersuchungen erforderlich.

⇒ **Der Einfluss variierender Nährstoffversorgung, Fermenterbeladungsraten und eines Enzymeinsatzes sollte untersucht werden, um eine Optimierung der Fermentationsvor- gänge zu erreichen.**

Um hohe Methanausbeuten zu erreichen, müssen die standortspezifisch erzeugten Energie- pflanzen für die Biogaserzeugung optimal miteinander kombiniert werden. In integrierten Fruchtfolgesystemen ergeben sich darüber hinaus sehr unterschiedliche Biomasseströme, die zusammen mit der Biomasse aus Verarbeitungsprozessen der Lebensmittelindustrie und den Wirtschaftsdüngern aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung durch die Verwertung in der Biogaserzeugung dem landwirtschaftlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden sollen. Daraus ergibt sich eine überaus hohe Kombinationsmöglichkeit von Stoffströmen für die Vergärung in Biogasanlagen. Aus der bestehenden Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten müssen die bes- ten standorttypischen Gärrohstoffmischungen gefunden und in ihrer Zusammensetzung opti- miert werden. Die in ihrer Zusammensetzung optimierten Gärrohstoffmischungen müssen zu- dem zeitlich und mengenmäßig in optimaler Weise den Fermentern zugeführt werden. Dadurch können eventuell vorhandene Cofermentationseffekte im Bereich der Gärung aufgedeckt und genutzt werden. Auf diese Weise wird es möglich sein, höchste Methanenergieerträge zu er- zeugen und vorhandene Stoffströme optimal stofflich und energetisch zu nutzen.

Zur Effizienzsteigerung der Biogaserzeugung können auch spezifische Enzyme eingesetzt werden. In diesem Bereich bedarf es aber noch einer Optimierung des Enzymeinsatzes in Hinblick auf Enzymart, Aufwandsmenge und Zeitpunkt der Anwendung.

Unter Laborbedingungen können die Fermentationsvorgänge in Biogasanlagen simuliert und für die oben erwähnten Bedingungen (unterschiedliche Gärrohstoffe und Enzymeinsatz) optimiert werden. Erst in einem zweiten Schritt müssen dann diese Ergebnisse unter praktischen Verhältnissen in laufenden Biogasanlagen verifiziert werden. Solch ein Vorgehen macht es möglich, Verfahrenskennwerte optimierter Biogaserzeugungssysteme kosten- und zeitökonomisch zu ermitteln und auf Biogasanlagen zu übertragen.

⇒ Umwelt- und klimarelevante Gasemissionen und Gerüchen aus Biogasanlagen müssen quantifiziert und gemindert werden.

Wie aktuelle Untersuchungsergebnisse zeigen, ist ein Großteil der neuen Biogasanlagen aus Kostengründen mit nicht abgedeckten bzw. offenen Güllelagerbehältern oder Güllelagunen ausgestattet. Untersuchungen aus dem Bereich der Wirtschaftsdüngerlagerung zeigen, dass 30 % der gesamten Stickstoffverluste in Form von Ammoniak aus dem Verfahrensbereich der Lagerung stammen. Die kostengünstige Abdeckung der Güllelagerbehälter ist im Bereich der Wirtschaftsdüngerlagerung derzeit Stand der Technik, um Ammoniakemissionsverluste wirksam zu vermindern. Die Gefahr der gasförmigen Ammoniakverluste ist bei Gärrückständen aus Biogasanlagen größer als bei herkömmlichen Güllelagerungssystemen, weil Gärrückstände im Vergleich zu Flüssigmist einen höheren Ammoniumgehalt und höhere pH-Werte aufweisen. In der Praxis ist derzeit ein starker Trend zu beobachten, aus den erwähnten Kostengründen offene Gärrückstandslager (Betonbehälter, Güllelagunen) zu installieren. Offene Güllelagerbehälter weisen insbesondere bei der Lagerung von Gärrückständen aus Biogasanlagen hohe Ammoniakverluste auf. Ammoniakverluste gefährden einerseits die Umwelt, andererseits stellen sie einen direkten Einkommensverlust für die Betriebe dar.

Neuerdings werden aus Kostengründen auch Biogasanlagensysteme in die Praxis umgesetzt, in denen sich das Gärsubstrat vergleichsweise kurze Zeit im kontrollierten, gasdichten Fermentersystem befindet. Diese Systeme besitzen zudem auch keine weiteren Nachgärbehälter. Dadurch gelangt betriebsmäßig und auch in besonderen Fällen wie z.B. bei Störungen im Fermenter biologisch hochaktives Material aus dem Fermenter in das offene Gülleendlager. Neben der Gefahr der umweltschädlichen Ammoniakgasemissionen besteht in diesen Fällen auch ein erhebliches Potenzial zur Bildung unkontrollierter Methanemissionen. Methan besitzt im Vergleich zu CO₂ ein ungefähr 21-fach höheres Treibgaspotenzial. Stattfindende Methanverluste stellen über den Klimaschaden hinaus auch eine Einkommensminderung für die Biogasanlagenbetreiber dar. Umwelt- und klimarelevante Gasemissionen aus Biogasanlagensystemen (speziell auch bei neuen Anlagen) müssen deshalb unter praxisnahen Bedingungen systematisch quantifiziert und soweit als irgendwie möglich reduziert werden. Gas- und Geruchsemissionen schaden dem Image der Biogaserzeugung in der Öffentlichkeit. Bestehende Quellen für Gerüche aus Biogasanlagen müssen ebenfalls soweit wie möglich verringert werden.

⇒ Biogaserzeugungssysteme müssen wirtschaftlich und ökologisch optimiert werden.

Alle empfohlenen Maßnahmen im Bereich des Energiepflanzenanbaus, der Fruchtfolgesysteme und Fermentationsvorgänge (siehe oben) müssen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin überprüft

werden, denn bei einer isolierten Betrachtung bleiben betriebsspezifische Rahmenbedingungen (z.B. vorhandene Betriebszweige und Faktorausstattung, Fruchtfolgebeschränkungen, Förderauflagen) für eine Umsetzung im landwirtschaftlichen Betrieb unberücksichtigt.

Für Biogaserzeugungssysteme (standorttypische Rohstoffherstellungs- und Fermentationssysteme) müssen Ökobilanzen erstellt werden. Eine komplette Darstellung der Prozesse, Emissionen und KEA (Kumulierten Energieaufwand) ermöglicht eine umfassende Bewertung bestehender und zukünftiger Systeme.

⇒ **Biogasanlagen und Biogaserzeugungssysteme sollen optimal regional verteilt sein.**

Es soll eine regional differenzierte Anpassung der Anlagendichte und der Leistung der Biogas- bzw. Biomethankraftwerke entsprechend der Verfügbarkeit von heimischen Rohstoffen erfolgen. Darüber hinaus sollte auch den Ansprüchen einer bedarfsgerechten Verteilung der Nährstoffe in den Gärrückständen als wertvolle organische Dünger zur bedarfsgerechten Ausbringung in Kulturpflanzenbestände Rechnung getragen werden. Ebenfalls berücksichtigt werden sollen regionaltypische Energieverteilungs- und Nutzungskonzepte für Biogas bzw. Biomethan.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- AMON, B., AMON, T., BOXBERGER, J. (1998): UNTERSUCHUNG DER AMMONIAKEMISSIONEN IN DER LANDWIRTSCHAFT ÖSTERREICHS ZUR ERMITTLUNG DER REDUKTIONSPOTENTIALE UND REDUKTIONSMÖGLICHKEITEN. INSTITUT FÜR LAND-, UMWELT- UND ENERGIETECHNIK (HRSG.), ENDBERICHT, FORSCHUNGSPROJEKT L 883/64 DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, WIEN.
- AMON, TH.; HACKL, E.; JEREMIC, D.; AMON, B. (2002A) KOFERMENTATION VON WIRTSCHAFTSDÜNGERN MIT ENERGIEGRÄSERN IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BIOGASANLAGEN. OPTIMIERUNG DER GÄRGUTMISCHUNGEN UND DES BIOGASERTRAGES; ENDBERICHT AN DIE KAMMER DER WIENER WIRTSCHAFT
- AMON, TH.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; MOITZI, G.; LYSON D.; HACKL, E.; JEREMIC, D.; ZOLLITSCH, W.; PÖTSCH, E.; MAYER, K.; PLANK, J. (2002B): METHANBILDUNGSVERMÖGEN VON MAIS – EINFLUSS DER SORTE, DER KONSERVIERUNG UND DES ERNTEZEITPUNKTES. ENDBERICHT OKTOBER 2002. IM AUFTRAG VON PIONEER SAATEN GES.M.B.H. PARNDORF (AUSTRIA)
- AMON, TH.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; HOPFNER-SIXT, K.; BUGA, S.; PÖTSCH, E.; ZOLLITSCH, W.; PLANK, J.; MAYER, K.; (2003A): NUTZUNG DER GRÜNLANDBIOMASSE, SOWIE ANDERER FELDKULTUREN FÜR DIE BIOGASPRODUKTION. IN: SCHRIFTREIHE DES ÖKOSOZIALEN FORUMS ÖSTERREICH. WINTERTAGUNG 2003. S.181–195
- AMON, TH.; HOPFNER-SIXT, K.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; PLANK, J. (2003B): GENEHMIGUNGSERFORDERNISSE FÜR BIOGASANLAGEN. IN: BAL-BERICHT ÜBER DIE GUMPENSTEINER BAUTAGUNG „STALLBAU-STALLKLIMA-TIERHALTUNG IN BIOLOGISCHEN BETRIEBEN- GENEHMIGUNGSVERFAHREN VOM 17. BIS 18. JUNI 2003; S. 41–48
- AMON, TH. ET AL. (2003C): OPTIMIERUNG DER BIOGASERZEUGUNG AUS DEN ENERGIEPFLANZEN MAIS UND KLEEGRAS, ENDBERICHT IM AUFTRAG DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT
- AMON, TH.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, B.; GRUBER, L. (2004A): ANAEROBIC DIGESTION OF MAIZE, CLOVER GRASS AND ANIMAL MANURES: INFLUENCE OF NUTRIENT COMPOSITION ON METHANE PRODUCTION. IN: WEISKE, A. (ED.) GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM AGRICULTURE, MITIGATION OPTIONS AND STRATEGIES, INTERNATIONAL CONFERENCE FEBRUARY 10–12. 2004, LEIBZIG, GERMANY, PP.102–106.
- AMON, TH.; KRYVORUCHKO V.; AMON B.; SCHREINER, M. (2004B): UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKUNG VON ROHGLYCERIN AUS DER BIODIESELERZEUGUNG ALS LEISTUNGSSTEIFERNDENDES ZUSATZMITTEL ZUR BIOGASERZEUGUNG AUS SILOMAIS, KÖRNERMAIS, RAPSPRESSKUCHEN UND SCHWEINEGÜLLE. ERGEBNISBERICHT MAI 2004. IM AUFTRAG DER SÜDSTEIRISCHEN ENERGIE- UND EIWEIßERZEUGUNG REG. GEN.M.B.H. (SEEG) MURECK.
- ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. (1993): THERMOPHILIC ANAEROBIC DIGESTION OF LIVESTOCK WASTE – THE EFFECT OF AMMONIA, APPL. MICROBIOL. BIOTECHN., 38, P.560–564
- ANGELIDAKI, I.; ELLEGAARD, L.; AHRING B.K. (1993): A MATHEMATICAL MODEL FOR DYNAMIC SIMULATION OF ANAEROBIC DIGESTION OF COMPLEX SUBSTRATES: FOCUSING ON AMMONIA INHIBITION. BIOTECH. BIOENG. 42, 159–166
- ANGERER, TH., 1999: ABLUFTREINIGUNG BEI DER MECHANISCH-BIOLOGISCHEN ABFALLBEHANDLUNG (MBA), BERICHT (BE-156) DES UMWELTBUNDESAMTES, WIEN, ISBN 3-85457-511-4

- ARLT, A., 2001: BIOGAS – MIT ERNEUERBAREN ENERGIEN RESSOURCEN SCHONEN. 10. JAHRESTAGUNG DES FACHVERBANDES BIOGAS E.V. BORKEN, 9.–12. JÄNNER 2001, TA-DATENBANK-NACHRICHTEN, NR.1 / 10. JAHRGANG – MÄRZ 2001, S. 116–118
- AUERNHAMMER (1981): AUFBAU UND STRUKTUR EINES KALKULATIONSSYSTEMS FÜR DIE ARBEITSZEITBEDARFSERMITTLUNG LANDWIRTSCHAFTLICHER ARBEITEN. IN: ARBEITSZEITKALKULATION IN DER LANDWIRTSCHAFT MIT DIALOGFÄHIGEN EDV-PROGRAMMEN AN GROSß- UND KLEINRECHNERN, NR. 8 IN SCHRIFTENREIHE DER LANDTECHNIK WEIHENSTEPHAN, S. 3-45
- BACH, ST., 2003: BIOGAS AUCH IN DAS ERDGASNETZ EINSPEISEN. IN: AGRARZEITUNG ERNÄHRUNGSDIENST VOM 23. MÄRZ 2003
- BASERGA U. (2000): VERGÄRUNG ORGANISCHER RESTSTOFFE IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BIOGASANLAGEN. FAT-BERICHTE 546.
- BASERGA, U.; EGGER K. (1998): VERGÄRUNG VON ENERGIEGRAS ZUR BIOGASGEWINNUNG. BIOGAS-FORUM [HTTP://WWW.BIOGAS.CH/F+E/GRASBASI.HTM](http://www.biogas.ch/f+e/grasbasi.htm)
- BATSTONE, D.J.; KELLER, J.; NEWELL, R.B.; NEWLAND, M. (2000): MODELLING ANAEROBIC DEGRADATION OF COMPLEX WASTEWATER. PART II: PARAMETER ESTIMATION AND VALIDATION USING SLAUGHTERHOUSE EFFLUENT. BIORESOURCE TECHN., 75 (1), P 75–85
- BATSTONE, D.J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, R.I.; KALYUZHNY, S.V.; PAVLOSTATHIS, S.G.; ROZZI, A.; SANDERS, W.T.M.; SIEGRIST, H.; VAVILIN, V.A. (2001): THE IWA ANAEROBIC DIGESTION MODEL NO 1 (ADM1), PROCEEDINGS OF 9TH WORLD CONGRESS ANAEROBIC DIGESTION, ANTWERPEN – BELGIUM, SEPTEMBER 2–6
- BERGMAIR, J. (2006): BIOMETHAN. AUFBEREITUNG VON BIOGAS ZUR EINSPEISUNG IN DAS SALZBURGER GASNETZ. KURZDARSTELLUNG. PROJEKT DER PROGRAMMLINIE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. HERAUSGEBER: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE.
- BJÖRNSSON, L.; BATSTONE, D.; CHRISTENSSON, K.; MATTIASSON, B. (2001): AGRIGAS – BIOGAS PRODUCTION FROM CROP RESIDUES. PROCEEDINGS OF 9TH WORLD CONGRESS ANAEROBIC DIGESTION, ANTWERPEN – BELGIUM, SEPTEMBER 2-6, P. 561 – 567
- BUTTLAR, V. C. (1996): ERHALTUNG GENETISCHER RESSOURCEN ÜBER DEN WEG DER ENERGETISCHEN NUTZUNG VON GANZPFLANZEN – AM BEISPIEL VON WINTERGERSTE. DISSERTATION UNIVERSITÄT KASSEL-WITZENHAUSEN.
- BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT), 1998: GRÜNER BERICHT – BERICHT ÜBER DIE LAGE DER ÖSTERREICHISCHEN LANDWIRTSCHAFT 1997. WIEN. 350 S.
- BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT), 2000: ÖPUL, 2000: SONDERRICHTLINIE FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PROGRAMM ZUR FÖRDERUNG EINER UMWELTGERECHTEN, EXTENSIVEN UND DEN NATÜRLICHEN LEBENSRAUMSCHÜTZENDEN LANDWIRTSCHAFT. ANHANG 2. DÜNGETABELLEN GEMÄß GRUNDFÖRDERUNG. 17 S.
- BMLFUW (2001): DER SACHGERECHTE EINSATZ VON BIOGASGÜLLE UND GÄRRÜCKSTÄNDEN IM ACKER- UND GRÜNLAND. FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ, WIEN
- BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT), 2002A: STANDARDDECKUNGSBEITRÄGE UND DATEN FÜR DIE BETRIEBSBERATUNG IM BIOLOGISCHEN LANDBAU 2002/2003. WIEN. 190 S.
- BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT), 2002B: STANDARDDECKUNGSBEITRÄGE UND DATEN FÜR DIE BETRIEBSBERATUNG 2002/2003. KONVENTIONELLE PRODUKTION. OSTÖSTERREICH. WIEN. 238 S.

- BMLFUW (2006): RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG, 6. AUFLAGE. FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ, WIEN; IM DRUCK
- BORJESSON, P. (1998) ENVIRONMENTAL EFFECTS OF ENERGY CROP CULTIVATION. IN: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE WÜRZBURG, GERMANY 8–11 JUNE 1998, S. 163–165
- BOYLE, W.C. (1977): ENERGY RECOVERY FROM SANITARY LANDFILLS. IN: A.G. SCHLEGEL, J. BARNEA, (EDS) MICROBIAL ENERGY CONVERSION, PP. 119–138
- BUSWELL, A.M. (1936): ANAEROBIC FERMENTATIONS. BULL. NO.32, DIV. STATE WATER SURVEY, UNIV. OF ILLINOIS P. 193.
- CHYNOWETH, D.P.; TURICK, C.E.; OWENS, J.M.; JERGER, D.E.; PECK, M.W. (1993) BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL OF BIOMASS AND WASTE FEEDSTOCKS. BIOMASS AND BIOENERGY, 1993, 5, 95–111
- DARNHOFER, I., EDER, M. UND SCHNEEBERGER, W. 2003: MODELLRECHNUNGEN ZUR UMSTELLUNG EINER ACKERBAUREGION AUF BIOLANDBAU. BERICHTE ÜBER LANDWIRTSCHAFT 81 (2): 57–73.
- DEGENHARDT, H. (2005): OPTIMIERUNG DES BIOGASERTRAGES DURCH ANGEPASSTE MAISSORTEN UND RICHTIGES ANBAUMANAGEMENT, FELDBERATER 1/2005, PIONEER HI-BRED NORTHERN EUROPE SALES DIVISION GMBH APENSER STRASSE 19821614 BUXTEHUDE; WWW.PIONEER.COM
- DEISENROTH, R. ET AL. 2004: LEITFADEN ZUR UMSETZUNG DER DÜNGEVERORDNUNG IN HESSEN. HESSISCHES DIENSTLEISTUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, GARTENBAU UND NATURSCHUTZ. 51 S.
- DICHTL, N., 1997: MÖGLICHKEITEN DER BIOGASNUTZUNG. IN: BIOGAS, VERWERTUNG UND AUFBEREITUNG. 09 ATV-SCHRIFTENREIHE, HRG. ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V., HENNEF, ISBN 3-927729-69-8
- DIELMANN, K.P., 2001: MIKROGASTURBINEN – TECHNIK UND ANWENDUNG. IN: BWK Bd. 53 (2001) NR. 6, S. 6–9
- DIELMANN, K.P.; KRAUTKREMER, B., 2002: BIOGASNUTZUNG MIT MIKROGASTURBINEN IN LABORUNTERSUCHUNGEN UND FELDTTESTS, STAND DER TECHNIK UND ENTWICKLUNGSCHANCEN, ELFTES SYMPOSIUM ENERGIE AUS BIOMASSE BIOGAS, PFLANZEÖL, FESTBRENNSTOFFE, OSTBAYRISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT E.V. (OTTI) REGENSBURG, TAGUNGSBAND, 11/2002
- DIETL, W., LEHMANN, J. UND JORQUERA, M., 1998: WIESENGRÄSER. VERLAG LANDWIRTSCHAFTLICHE LEHRMITTELZENTRALE, ZOLLIKOFEN (SCHWEIZ). 191 S.
- DLG – DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT (1997): ERGÄNZUNGEN ZU DEN DLG-FUTTERWERTTABELLEN FÜR WIEDERKÄUER WIESEN- UND WEIDEFUTTER AUS DEM ÖSTERREICHISCHEN ALPENRAUM (DATENGRUNDLAGE AUS ÖSTERREICH); 7. ERWEITERTE UND ÜBERARBEITETE AUFLAGE, DLG-VERLAG, FRANKFURT/MAIN, 1997, S. 203–212
- DIN 38 414 (1985): BESTIMMUNG DES FAULVERHALTENS „SCHLAMM UND SEDIMENTE“
- DÖHLER H.; MENZI H.; SCHWAB M. (2002) EMISSIONEN BEI DER AUSBRINGUNG VON FEST- UND FLÜSSIGMIST UND MINDERUNGSMAßNAHMEN, IN: EMISSIONEN DER TIERHALTUNG, KTBL/UBA SYMPOSIUM 3.–5. DEZEMBER 2001, BILDUNGSZENTRUM KLOSTER BANZ, HRSG. KTBL, DARMSTADT
- DOSCH (1995) OPTIMIERUNG DER VERWERTUNG VON GÜLLESTICKSTOFF DURCH SEPARIERTECHNIK UND KULTURARTSPEZIFISCHE APPLIKATIONSTECHNIKEN. IN: BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (EDS.), GELBES HEFT NR. 56, LANDTECHNISCHE BERICHTE AUS PRAXIS UND FORSCHUNG, MÜNCHEN

- EDELMANN, W. (2001) BIOGASERZEUGUNG UND NUTZUNG. IN: ENERGIE AUS BIOMASSE – GRUNDLAGEN, TECHNIK UND VERFAHREN. S. 641–692. SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG NEW YORK. KALTSCHMITT & HARTMANN (HERSG.). ISBN 3-540-64853-4
- EDER, M., LINDENTHAL, T. UND AMON, T., 1997: GRUNDWASSERSANIERUNG ALS CHANCE. GRUNDWASSERSANIERUNG IN DER WELSER HEIDE UND TRAUN-ENNS PLATTE MIT MAßNAHMEN DES BIOLOGISCHEN LANDBAUS UND BIOGAS. STUDIE NR. 31, WWF, WIEN, 65 S.
- EDER, M. UND DARNHOFER, I., 2003: EINFLUSS VON PREISZUSCHLÄGEN UND FÖRDERUNGSHÖHE AUF DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT UND DAS RISIKO EINER UMSTELLUNG AUF BIOLANDBAU IN EINEM ACKERBAUGEBIET. IN: FREYER B., (HRSG.): ÖKOLOGISCHER LANDBAU DER ZUKUNFT: BEITRÄGE ZUR 7. WISSENSCHAFTSTAGUNG ZUM ÖKOLOGISCHEN LANDBAU, 24.–26. 2. 2003 IN WIEN: 321–324.
- EDER, M., 2005: PERSÖNLICHE MITTEILUNG, MAI 2005. INSTITUT FÜR AGRAR- UND FORSTÖKONOMIE, DEPARTMENT FÜR WIRTSCHAFTS- UND SOZIALWISSENSCHAFTEN, UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN, FEISTMANTELSTRASSE 4, A-1180 WIEN
- ENTEC, 2003: DER ENTEC-SULFUREX® PROZESS – DAS SELEKTIVE ENTSCHEWELUNGSVERFAHREN. ENTEC ENVIRONMENT TECHNOLOGY; UMWELTTECHNIK GMBH, FUSSACH
- EU-VO 2092/91 (1991): EU-VERORDNUNG ÜBER DEN ÖKOLOGISCHEN LANDBAU UND DIE ENTSPRECHENDE KENNZEICHNUNG DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN ERZEUGNISSE UND LEBENSMITTEL, DOK.NR. 1991R2092 WASSERRECHTSGESETZ – WRG (1959): IDF BGBL. I NR. 87/2005
- FAL, BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2005): ERGEBNISSE DES BIOGASMESSPROGRAMMS. HERAUSGEBER: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW. FREYER, B., 2003: FRUCHTFOLGEN, KONVENTIONELL – INTEGRIERT – BIOLOGISCH. VERLAG EUGEN ULMER GMBH & CO, STUTTGART. 203 S.
- FERNANDEZ, 2003: BIOGAS ALS TREIBSTOFF. VORTRAG IM RAHMEN DES BIO-EXPERTEN STAMMTISCHES IN GRAZ, AM 12. NOVEMBER 2003
- FREYER, B., PIETSCH, G., HRBEK, R. UND WINTER, S., 2005: FUTTER- UND KÖRNERLEGUMINOSEN IM BIOLOGISCHEN LANDBAU. ÖSTERREICHISCHER AGRARVERLAG, LEOPOLDSORF. 176 S.
- FRIEDRICHS, G., 2003 ANFORDERUNGEN UND VORAUSSETZUNGEN AN DIE EINSPEISUNG IN DAS ÖFFENTLICHE GASNETZ. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- FRÜCHTENICHT, K. ET AL., 1993: PFLANZENERNÄHRUNG UND DÜNGUNG. IN: HYDRO AGRI DÜLMEN GMBH: FAUSTZAHLEN FÜR LANDWIRTSCHAFT UND GARTENBAU. LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH, BOCHUM, 12. AUFLAGE, 254–295.
- GALLERT, C. & WINTER, J. (1998) MIKROBIOLOGIE ANAEROBER GÄRPROZESSE, IN: TECHNIK ANAEROBER PROZESSE, S. 19–34, DACHEMA-FACHGESPRÄCHE UMWELTSCHUTZ, BEITRÄGE EINER VERANSTALTUNG DES SONDERFORSCHUNGSBEREICHES 238 DER DFG IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEM DACHEMA-FORSCHUNGSAUSSCHUß BIOTECHNOLOGIE VOM 7. BIS 9. OKTOBER 1998 AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG, H. MÄRKL & R. STEGMANN (HRSG.), ISBN 3-926959-95-9
- GIKOPOULOS, CH., 2003: EINSPEISUNG VON BIOGAS IN EIN ERDGASNETZ – QUALITÄTSERFORDERNISSE AUS DER SICHT EINES GASNETZBETREIBERS. VORTRAG IM RAHMEN DES 1. INTERNATIONALEN BIOGAS EXPERTINNEN-STAMMTISCHS, 12.–14. NOVEMBER 2003, SCHLOSS SEGGAU BEI LEIBNITZ
- GRAF, W., 2002: DER BIOGASREPORT: STAND DER TECHNIK – POTENTIALE – PERSPEKTIVEN, BOOKS ON DEMAND GMBH, ISBN: 3-8311-3494-4

- GRÖBLINGHOFF, F., LÜTKE ENTRUP, N. UND BLOCK, K. 2005: MAIS LIEFERT VIEL METHAN. INTERNETQUELLE: [HTTP://WWW3.FH-SWF.DE/FBAW/DOWNLOAD/BIOGASMAIS-
WOCHENBLATT2005.PDF](http://www3.fh-swf.de/fbaw/download/biogasmais-wochenblatt2005.pdf). 30. NOVEMBER 2005.
- GRONAUER, A. UND BACHMAIER, H., 2005: DEN PROZESS BEHERRSCHEN. WOCHENBLATT-SERIE „BIOGAS“, TEIL 8: ENTWICKLUNGSTRENDS BEIM BIOGAS. INTERNETQUELLE: [HTTP://WWW.LFL.BAYERN.DE/ARBEITSSCHWERPUNKTE/AS_BIOGAS/10904/LINKURL_0_2_0_7.P
DF](http://www.lfl.bayern.de/arbeitschwerpunkte/as_biogas/10904/linkurl_0_2_0_7.pdf). 30.NOVEMBER 2005
- GRONAUER (1993) EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AMMONIAKFREISETZUNG AUS FLÜSSIGMIST ALS GRUNDLAGE VERFAHRENSTECHNISCHER VERBESSERUNGEN, DISSERTATION VERÖFFENTLICHT IN „GELBES HEFT“ NR. 47, BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN
- GUNASEELAN V.N. (1995) EFFECT OF INOCULUM/SUBSTRATE RATIO AND PRETREATMENTS ON METHANE YIELD FROM PARTHENIUM, BIOMASS & BIOENERGY 8(1) PP. 39–44
- HARASEK, M. (2006): TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN DER BIOGASAUFBEREITUNG. TAGUNGSBAND ZUR BIOGAS06, 22. UND 23. MÄRZ 2006, LINZ.
- HELMS, P., 2002: BIOLOGISCHE ENTSCHEWELUNG. IN: ERNEUERBARE ENERGIE IN DER LAND(WIRT)SCHAFT 2002/2003 – BAND 5. VERLAG FÜR LAND(WIRT)SCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN, MICHAEL C. MEDENBACH, ZEVEN, ISBN 3-935781-04-0
- HENZE, M.; GRADY, C.P.L.; GUJER, W.; MARAIS, G.V.R. AND MATSUO, T. (1986): ACTIVATED SLUDGE MODEL No. 1. IAWQPRC, LONDON
- HERDIN, G.R. (2000) BIOMASSENUTZUNG ZUR STROMPRODUKTION VERGLEICH VERSCHIEDENER TECHNIKEN – DER GASMOTOR IM MITBEWERB ZUM ZÜNDSTRAHLMOTOR, JENBACHER AG, JENBACH
- HERDIN, G.R., 2003: VORTEILE DES BIOGAS-OTTOMOTORS GEGENÜBER ANDERER TECHNIKEN. IN: BIOGAS – ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT. VDI-BERICHT 1751, TAGUNG LEIPZIG, 11.–16. MÄRZ 2003, VDI VERLAG GMBH, DÜSSELDORF, ISBN 3-18-0917551-2
- HOPFNER-SIXT, K. ET AL. (2003) MONITORING FÜR BIOGASANLAGEN IN OBERÖSTERREICH. ENDBERICHT IM AUFTRAG DER OBERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG
- HORNACHNER, D., HUTTER, G., MOOR, D. (2005): BIOGAS-NETZEINSPEISUNG. RECHTLICHE, WIRTSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN IN ÖSTERREICH. BERICHT AUS ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG 19A/2005. KURZFASSUNG. PROJEKT DER PROGRAMMLINIE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. HERAUSGEBER: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE
- HORNACHNER, D., HUTTER, G., MOOR, D. (2006): RECHTLICHE, WIRTSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE BIOGAS-NETZEINSPEISUNG IN ÖSTERREICH. TAGUNGSBAND „BIOGAS – INNOVATIVE ANSÄTZE FÜR DIE NETZEINSPEISUNG“, ERGEBNISSE AUS „ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT“, 1. FEBRUAR 2006, WIEN
- JÄGER, F. (2002): MAIS ALS ENERGIEPFLANZE FÜR DIE BIOGASPRODUKTION, KWS MAIS GMBH, FACHBERATUNG MAIS
- JÖNSSON, O. UND PERSSON, M, 2003: BIOGAS AS TRANSPORTATION FUEL. IN: FACHTAGUNG – REGENERATIVE KRAFTSTOFFE – ENTWICKLUNG, FE-ANSÄTZE, PERSPEKTIVEN, 13.–14. NOVEMBER 2003, ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG, STUTTGART
- KALTSCHMITT, M. UND HARTMANN, H., 2001: ENERGIE AUS BIOMASSE: GRUNDLAGEN, TECHNIKEN UND VERFAHREN, SPRINGER-VERLAG, BERLIN HEIDELBERG, ISBN 3-540-64853-4
- KAPARAJU, P.; LUOSTARINEN, S.; KALMARI, E.; KALMARI, J.; RINTALA, J. (2001): CO-DIGESTION OF ENERGY CROPS AND INDUSTRIAL CONFECTIONERY BY-PRODUCTS WITH COW MANURE: BATCH

- SCALE AND FARM SCALE EVALUATION. PROCEEDINGS OF 9TH WORLD CONGRESS ANAEROBIC DIGESTION, ANTWERPEN – BELGIUM, SEPTEMBER 2–6, P. 363–368
- KARPENSTEIN-MACHAN, M., BUTTLAR, V. C., SCHEFFER, K. (1997): LANDESKULTURELLER WERT VON ALTEN SORTEN IM HINBLICK AUF EINE ENERGETISCHE NUTZUNG AM BEISPIEL WINTERWEIZEN. VORTRÄGE FÜR PFLANZENZÜCHTUNG. 39, S.176–180
- KARPENSTEIN-MACHAN, M. (2005): ENERGIEPFLANZENBAU FÜR BIOGASANLAGENBETREIBER, DLG-VERLAGS-GMBH, FRANKFURT AM MAIN
- KAUSCH, J., FISCHER, K. (2006): VERGÄRUNG VON SILAGE IN BEFAHRBAREN BOXENFERMENTERN. LANDTECHNIK 61, 28–29
- KAUTZ, H., EISENKÖLB, G. UND WACH, I. 2001: REGIONALBERICHT 2000. ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR RAUMPLANUNG. BUNDESKANZLERAMT (HRSG.), WIEN
- KELLNER, O.J.; DREPPER, K.; ROHR, K. (1984) GRUNDZÜGE DER FÜTTERUNGSLEHRE. PAREY HAMBURG, P. 143
- KIRCHGESSNER, M. (1992) TIERERNÄHRUNG, 8. AUFLAGE, DLG-VERLAG, FRANKFURT AM MAIN
- KRATOCHVIL, R., 2003: BETRIEBS- UND REGIONALWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE EINER GROßFLÄCHIGEN BEWIRTSCHAFTUNG NACH DEN PRINZIPIEN DES ÖKOLOGISCHEN LANDBAUS AM BEISPIEL DER REGION MOSTVIERTEL-EISENWURZEN. DISSERTATION, UNIV. F. BODENKULTUR WIEN. 226 S
- KRAUTKTREMER, B. (2003): ANFORDERUNGEN AN DIE QUALITÄT VON BIOGAS BEIM EINSATZ VON MIKROGASTURBINEN. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- KRAUTKTREMER, B., 2003A: ANFORDERUNGEN AN DIE QUALITÄT VON BIOGAS BEIM EINSATZ VON MIKROGASTURBINEN. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- KRAUTKTREMER, B., 2003B: VERFAHRENSÜBERSICHT: BIOGASERZEUGUNG UND VERSTROMUNG. IN: FACHTAGUNG – REGENERATIVE KRAFTSTOFFE – ENTWICKLUNG, FE-ANSÄTZE, PERSPEKTIVEN, 13.–14. NOVEMBER 2003, ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG, STUTTGART
- KRIEG & FISCHER (2002) GRASVERGÄRUNG AUS WISSENSCHAFTLICHER SICHT.
<http://www.KriegFischer.de>
- KRILL, H., 1993: ADSORPTIVE ABGASREINIGUNG – EINE BESTANDSAUFNAHME. IN: VDI BERICHTE 1034 „FORTSCHRITTE BEI DER THERMISCHEN, KATALYTISCHEN, SORPTIVEN UND BIOLOGISCHEN ABGASREINIGUNG. KOLLOQUIUM MANNHEIM, MÄRZ 1993
- KTBL 1996 KTBL-ARBEITSPAPIER 235 „ENERGIEVERSORGUNG UND LANDWIRTSCHAFT“. IN: [HTTP://WWW.INARO.DE/DEUTSCH/ROHSTOFF/ENERGIE/BIOMASSE/BIOMUMW1.HTM](http://www.inaro.de/DEUTSCH/ROHSTOFF/ENERGIE/BIOMASSE/BIOMUMW1.HTM)
- KTBL, KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (2004): HANDBUCH BIOGASGEWINNUNG UND -NUTZUNG, ENDBERICHT ERSTELLT IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEM INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GMBH (IE) UND DER BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (FAL), AUFTRAGGEBER: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT), 2005: GAS AUSBEUTE IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BIOGASANLAGEN. KTBL-SCHRIFTEN-VERTRIEB IM LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH, MÜNSTER
- KUSCH, S., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T. (2005): VERGÄRUNG LANDWIRTSCHAFTLICHER SUBSTRATE IN DISKONTINUIERLICHEN FESTSTOFFFERMENTERN. AGRARTECHNISCHE FORSCHUNG 11, 81–91

- LANGHANS, G. (2002): PROBEAUFBEREITUNG FÜR GÄRVERSUCHE; VDI WS „VERGÄRUNG ORGANISCHER STOFFE“ DÜSSELDORF 18./19. APRIL 2002
- LEDJEFF-HEY, K., MAHLENDORF, F. UND ROES, J., 2001: BRENNSTOFFZELLEN – EIN ÜBERBLICK. IN BRENNSTOFFZELLEN – ENTWICKLUNG, TECHNOLOGIE, ANWENDUNG. VERLAG C.F. MÜLLER, HRSG. LEDJEFF-HEY/MAHLENDORF/ROES. 2. AUFLAGE, HEIDELBERG, S. 11–35
- LINDENTHAL, T. UND FREYER, B. ET AL., 2004: FLÄCHENDECKENDE UMSTELLUNG AUF BIOLOGISCHEN LANDBAU: INTEGRATIVE AKZEPTANZ- UND WIRKUNGSANALYSE ANHAND AUSGEWÄHLTER UNTERSUCHUNGSREGIONEN. WIEN. 107 S
- LINKE, B.; BAGANZ, K.; SCHLAUDERER, R. (1999) NUTZUNG VON FELDFRÜCHTEN ZUR BIOGASGEWINNUNG. AGRARTECHNISCHE FORSCHUNG 5 (1999) H.2, S. 82–90
- MACHMÜLLER, A. (2003): MEDIUM-CHAIN FATTY ACIDS – AN EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THEIR POTENTIAL TO REDUCE METHANOGENESIS IN DOMESTIC RUMINANTS. HABILITATION THESIS SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, DEPARTMENT OF AGRICULTURE AND FOOD SCIENCES, ETH ZÜRICH
- MÄHNERT, P.; HEIERMANN, M.; PLÖCHL, M.; SCHELLE, H.; LINKE, B. (2002) VERWERTUNGSAalternativen FÜR GRÜNLANDBESTÄNDE – FUTTERGRÄSER ALS KOSUBSTRAT FÜR DIE BIOMETHANISIERUNG, LANDTECHNIK 5/2002, S. 260–261
- MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. (2000): BROCK MIKROBIOLOGIE, HRSG. W. GOEBEL, SPEKTRUM AKADEMISCHER VERLAG GMBH HEIDELBERG, BERLIN
- MCCARTY, P.L.; MOSEY, F.E. (1991): MODELLING OF ANAEROBIC DIGESTION PROCESS (A DISCUSSION OF CONCEPTS). WATER SCI. TECHNOL. 24: P 17–33
- MESSNER (1988) DÜNGEWIRKUNG ANAEROB FERMENTIERTER UND UNBEHANDELTER GÜLLE. DISSERTATION, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN-WEIHENSTEPHAN, FAKULTÄT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND GARTENBAU, FREISING
- MITTERLEITNER, H., 2002: ZÜNDSTRAHLER ODER GASMOTOR: WELCHES BHKW KOMMT IN FRAGE. IN: BIOGAS – STROM AUS GÜLLE UND BIOMASSE. TOP AGRAR FACHBUCH. HSG: TOP AGRAR, LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH, MÜNSTER
- MOE, P.W.; TYRRELL, H.F.; REYNOLDS, P.J. (1987) ENERGY METABOLISM OF FARM ANIMALS: PROCEEDINGS OF THE 10TH SYMPOSIUM HELD AT AIRLIE, VIRGINIA. SEPTEMBER 1985
- MUCH, P., M. SINGER, E. PFUNDTNER UND E.M. PÖTSCH (2004): HYGIENESTATUS VON GÄRRÜCKSTÄNDEN AUS ÖSTERREICHISCHEN BIOGASANLAGEN“. 10. ALPENLÄNDISCHES EXPERTENFORUM „BIOGASPRODUKTION – ALTERNATIVE BIOMASSENUTZUNG UND ENERGIEGEGWINNUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT“, BAL GUMPENSTEIN
- MUCHE, H., OLES, J. UND VOß, U., 1998: BIOGAS-ENTSCHWEFELUNG – MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN. IN: IN: TECHNIK ANAEROBER PROZESSE, DECHMA-FACHGESPRÄCHE UMWELTSCHUTZ, HRSG: H. MÄRKL UND R. STEGMANN, DECHMA, FRANKFURT AM MAIN, S. 19–34, ISBN 3-926959-95-9
- MUKENGELE, M., BRULÉ, M., OECHSNER, H. (2006): EINFLUSS DER SUBSTRATMISCHUNG AUS ENERGIEPFLANZEN AUF ABBAUKINETIK UND METHANERTRAG. LANDTECHNIK 61, 26–27
- NEHRING, K.; BEYER, M.; HOFFMANN, B. (1972) FUTTERMITTELTABELLENWERK. VEB BERLIN, P. 452.
- NEUBARTH & KALTSCHMITT (2000): ERNEUERBARE ENERGIEN IN ÖSTERREICH, HRSG. SPRINGER-VERLAG/WIEN, ISBN 3-211-83579-2
- NORDBERG, A. (1996): ONE AND TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTION OF LEY CROP SILAGE WITH AND WITHOUT LIQUID RECIRCULATION – REPORT 64, SWEDISH UNIVERSITY OF AGRUCULTURAL SCIENCES, UPPSALA, SWEDEN

- OHEIM VON R., 1999: BETRIEBSERFAHRUNGEN VON BIOGASANLAGEN. ATV-SEMINAR BIOGAS, VERWENDUNG UND AUFBEREITUNG, ESSEN, 8./9. FEBRUAR 1999
- OTT, M. UND TAMM, D., 2003: ANFORDERUNGEN BEIM EINSATZ VON BIOGAS IN BRENNSTOFFZELLEN. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- PAVLOSTATHIS, S.G. & GOSSETT, J.M. (1986): A KINETIC MODEL FOR ANAEROBIC DIGESTION OF BIOLOGICAL SLUDGE. BIOTECH. BIOENG. 28, 1519–1530
- PERETZKI, F. UND DITTMANN, T., 2004: EINSATZ ALS DÜNGER UND INVERKEHRBRINGEN DER GÄRRÜCKSTÄNDE. BIOGASHANDBUCH BAYERN – MATERIALIENBAND, KAPITEL 2.2.7. INTERNETQUELLE: [HTTP://WWW.BAYERN.DE/LFU/ABFALL/BIOGASHANDBUCH/KAPITEL/KAP227.PDF](http://www.bayern.de/lfu/abfall/biogashandbuch/kapitel/kap227.pdf). 24. OKTOBER 2005. 3–13.
- PLANK, J., 2004: EIN ÖSTERREICHISCHES BIOGASTREIBSTOFFKONZEPT ALS BEITRAG ZUR EU-TREIBSTOFFRICHTLINIE. VORTRAG IM RAHMEN DER BIOGASTAGUNG VOM BIOMASSEVERBAND IN GRAZ, AM 31. MÄRZ 2004
- PÖTSCH, E.M., E. PFUNDTNER, R. RESCH UND P. MUCH (2004A): STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG UND AUSBRINGUNGSEIGENSCHAFTEN VON GÄRRÜCKSTÄNDEN AUS BIOGASANLAGEN. BERICHT 10. ALPENLÄNDISCHES EXPERTENFORUM „BIOGASPRODUKTION – ALTERNATIVE BIOMASSENUTZUNG UND ENERGIEGEWINNUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT“. GUMPENSTEIN, 18.-19.03.2004, 37–47.
- PÖTSCH, E.M., R. RESCH, P. MUCH UND E. PFUNDTNER (2004B): BIOGASPRODUKTION – EINE PRODUKTIONALTERNATIVE FÜR DIE LANDWIRTSCHAFT. BERICHT 13TH CONFERENCE ON NUTRITION OF DOMESTIC ANIMALS „ZADRAVEC-ERJAVEC TAGE“, RADENCI, 4.–5.11.2004, 214–226.
- PÖTSCH, E.M., E. PFUNDTNER AND P. MUCH (2004): NUTRIENT CONTENT AND HYGIENIC PROPERTIES OF FERMENTATION RESIDUES FROM AGRICULTURAL BIOGAS PLANTS. 19TH EGF-MEETING IN LUZERN, CH, 21.-24. JUNE 2004, 1055-1057.
- POUECH, P.; FRUTEAU, H.; BEWA, H. (1998A) AGRICULTURAL CROPS FOR BIOGAS PRODUCTION ON ANAEROBIC DIGESTION PLANTS. IN BIOMASS FOR ENERGY AND INDUSTRY, C.A.R.E.N., PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE WÜRZBURG, GERMANY, 8–11 JUNE 1998, S. 163–165
- POUECH, P.; FRUTEAU, H.; BEWA, H. (1998B) BIOMASS CO-FERMENTATION IN A FULL-SCALE ANAEROBIC DIGESTER INFLUENCE OF RUNNING PARAMETERS. IN BIOMASS FOR ENERGY AND INDUSTRY, C.A.R.E.N., PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE WÜRZBURG, GERMANY, 8–11 JUNE 1998, S. 714–717
- PRECHTL, S., SCHNEIDER, R., ANZER, T. UND FAULSTICH, M., 2003: MIKROBIOLOGISCHE ENTSCHEWELUNG VON BIOGAS. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- REHER, S., 2003: KRAFTSTOFFE AUS BIOGAS. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- RIEDER, J. (1983) DAUERGRÜNLAND. BLV VERLAGSGESELLSCHAFT; FRANKFURT (MAIN) ISBN 3-40512737-8
- SEDLMEIER J. (2000) FUTTERRÜBEN ALS KRAFTWERK. IN: [HTTP://WWW.GRUENE-NIEDERSACHSEN.DE/LTF/TEMEN/LANDWIRT/BIOGAS/BGATRUEB.HTM](http://www.gruene-niedersachsen.de/LTF/TEMEN/LANDWIRT/BIOGAS/BGATRUEB.HTM)
- SCHAAF, H., 2005: BIOGASGÜLLE ALS AUFGEWERTETER WIRTSCHAFTSDÜNGER FÜR DEN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEB. INTERNETQUELLE: [HTTP://WWW.FRMTCFM.DE/ALLGEMEIN/FACHTAGUNGEN/BIOGASGULLEDUNGUNG.DOC](http://www.frmtcfm.de/allgemein/fachtagungen/biogasgulledungung.doc). 25. OKTOBER 2005.

- SCHAUSS, K., RATERING, S. UND SCHNELL, S., 2005: EINFLUSS FERMENTIERTER ORGANISCHER DÜNGER AUF SPURENGASEMISSIONEN IM ÖKOLOGISCHEN PFLANZENBAU. IN HEß, J UND RAHMANN, G. (HRSG.): ENDE DER NISCHE, BEITRÄGE ZUR 8. WISSENSCHAFTSTAGUNG ÖKOLOGISCHER LANDBAU. 1.–3. MÄRZ. 2005 IN KASSEL. 598–592
- SCHIEMANN R. (1971) ENERGETISCHE FUTTERBEWERTUNG UND ENERGIENORMEN. VEB, DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTSVERLAG, BERLIN
- SCHLATTMANN, M., SPECKMAIER, M., GRONAUER A. (2005): ENTWICKLUNG EINES DATENBANK-SYSTEMS ZUR AUSWERTUNG VON BIOGASVERSUCHEN. AGRARTECHNISCHE FORSCHUNG 11, 162–174
- SCHMIDT, W. (2005): MAISZÜCHTUNG FÜR DIE ENERGIEERZEUGUNG, KWS SAAT AG, GRIMSEHLSTRASSE 31, 37574 EINBECK, VORTRAG ANLÄSSLICH DER WISSENSCHAFTLICHEN TAGUNG DES DACHVERBANDES AGRARFORSCHUNG (DAF) E.V. BRAUNSCHWEIG AM 26. UND 27. OKTOBER 2005
- SCHNECK, H., 2002: TIPPS FÜR EINEN ERFOLGREICHEN KLEEGRASANBAU IM ÖKOLOGISCHEN LANDBAU. INTERNETQUELLE: [HTTP://WWW.STMLF-DESIGN2.BAYERN.DE/AFLUE/RE/OEKO/FACHINFO/KLEEGRAS.PDF](http://www.stmlf-design2.bayern.de/aflue/re/oeko/fachinfo/klee gras.pdf). 7. NOVEMBER 2005
- SCHNEIDER B.H., FLATT W.P. (1975) THE EVALUATION OF FEEDS THROUGH DIGESTIBILITY EXPERIMENTS. UNIVERSITY OF GORGIA PRESS ATHENS, P.423
- SCHNEIDER, R., PRECHTL, ST., WINTER, H. UND QUICKER, P., 2000: MIKROBIOLOGISCHE REDUKTION DES H₂S-GEHALTES VON BIOGAS. IN: INNOVATION IN DER BIOGASTECHNOLOGIE – FACHBETRÄGE ZUR GEMEINSAMEN FACHTAGUNG DER REGIERUNG VON NIEDERBAYERN UND DER FACHHOCHSCHULE DEGGENDORF, 13. DEZEMBER 2000, DEGGENDORF
- SCHNELL, H.-J., 2003A: STÖRSTOFFE IM BIOGAS. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- SCHNÜRER, A.; ZELLNER, G.; SVENSSON, H. (1999) MESOPHILIC SYNTROPHIC ACETATE OXIDATION DURING METHANE FORMATION IN BIOGAS REACTORS. FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY 29 (1999) 249–261
- SCHOLWIN, F., WEIDELE, T. UND GATTERMANN, H., 2004A: GASAUFBEREITUNG UND VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN. IN: HANDREICHUNG BIOGASGEWINNUNG UND -NUTZUNG, ENDBERICHT, FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- SCHULTE-SCHULZE BERNDT, A.. 2001: INNOVATIVE BIOGASNUTZUNGSKONZEPTE – EINSATZ VON BIOGAS ALS KRAFTSTOFF ODER ERDGASSUBSTITUT. VDI-BERICHT NR. 1620, S. 181–207
- SCHULTE-SCHULZE BERNDT, A. (2003): GASAUFBEREITUNG MITTELS DRUCKWECHSELADSORPTION. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- SCHULZ, H. (& EDER, B.), 2001: BIOGAS-PRAXIS, GRUNDLAGEN, PLANUNG, ANLAGENBAU, BEISPIELE. 2. ÜBERARB. AUFLAGE, STAUFEN BEI FREIBURG
- SCHULZ, W., HILLE, M. UND TENTSCHER, W., 2003: UNTERSUCHUNG ZUR AUFBEREITUNG VON BIOGAS ZUR ERWEITERUNG DER NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN. GUTACHTEN IM AUFTRAG DES BREMER ENERGIE INSTITUTES, BREMEN
- SHOEMAKER, A.H.H.M., VISSER, A. UND PFEIFFER, E., 2000: TREATMENT OF BIOGAS. AD-NETT REPORT 2000, HENRIK ORTENBLAD (ED.), EC-FAIR, S. 125–141
- SIMON, R. UND SCHWANHÄUßLER, M., 2004: TRENDS BEI BLOCKHEIZKRAFTWERKEN – NEUE VERFAHREN UND TECHNIKEN DER GASVERWERTUNG. IN: DIE LANDWIRTSCHAFT ALS ENERGIEERZEUGER. KTBL-TAGUNG VOM 30. BIS 31 MÄRZ 2004, KTBL-SCHRIFT 420, DARMSTADT, ISBN 3-7843-2162-3

- SINGER, M. (2005): ERFASSUNG DES HYGIENISCHEN ZUSTANDES VON GÄRRÜCKSTÄNDEN AUS LANDWIRTSCHAFTLICHEN BIOGASANLAGEN UND DARSTELLUNG DES DARAUS RESULTIERENDEN RISIKOPOTENTIALS. DIPLOMARBEIT AM INSTITUT FÜR PFLANZENBAU UND PFLANZENZÜCHTUNG DER UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR
- STEIN-BACHINGER, K., BACHINGER, J. UND SCHMITT, L., 2004: NÄHRSTOFFMANAGEMENT IM ÖKOLOGISCHEN LANDBAU. EIN HANDBUCH FÜR BERATUNG UND PRAXIS. KTBL-SCHRIFT 423. KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (HRSG.). LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GMBH, MÜNSTER. 136 S.
- STINNER, W., MÖLLER, K. UND LEITHOLD, G., 2005: BIOGASERZEUGUNG IM VIEHLOSEN BETRIEB: EFFEKTE AUF STICKSTOFFMANAGEMENT, ERTRÄGE UND QUALITÄT. IN HEß, J UND RAHMANN, G, (HRSG.): ENDE DER NICHE, BEITRÄGE ZUR 8. WISSENSCHAFTSTAGUNG ÖKOLOGISCHER LANDBAU. 1.–3. MÄRZ. 2005 IN KASSEL. 185–188
- STRICKER, M., 2003: EINSPEISUNG VON BIOGAS AUS SICHT EINES ERDGASNETZBETREIBERS. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- TENTSCHER, W., 2001: BIOGAS IM ENERGIEMIX, BRENNSTOFF FÜR VIRTUELLE KRAFTWERKE. IN: ERNEUERBARE ENERGIE IN DER LAND(WIRT)SCHAFT. HRSG. MICHAEL C. MEDENBACH, ZEVEN, ISBN 3-935781-02-4
- TENTSCHER, W. UND LANSSON, M., 2003: GASAUFBEREITUNG MITTELS NASSER GASWÄSCHE IN SCHWEDEN. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- VAN ES A.J.H.; VAN DER MEER J.M. (1980) METHODS OF ANALYSIS FOR PREDICTING THE ENERGY AND PROTEIN VALUE OF FEEDS FOR FARM ANIMALS. INSTITUTE FOR LIVESTOCK FEEDING AND NUTRITION RESEARCH, LELYSTAD, NETHERLANDS, P. 106.
- WALLA, CH.; SCHNEEBERGER, W. (2003): ANALYSE DER INVESTITIONSKOSTEN UND DES ARBEITSZEITBEDARFS LANDWIRTSCHAFTLICHER BIOGASANLAGEN IN ÖSTERREICH. BERICHTE ÜBER LANDWIRTSCHAFT, 81, 4, 527–535
- WALLA, C., 2004A: BIOGASPRODUKTION IN RINDERHALTENDEN BETRIEBEN. IN: SVATOS M. (HRSG.): DIE EU INTEGRATION TSCHEDIENS – ANPASSUNGSPROZESSE IM AGRARSEKTOR DES ÖSTERREICHISCH-TSCHECHISCHEN GRENZRAUMES. BEITRÄGE DES WISSENSCHAFTLICHEN SEMINARS ANLÄSSLICH DER "AKTION ÖSTERREICH-TSCHECHISCHE REPUBLIK", 6.–9. JULI 2004 IN WIEN UND PRAG. 25–29
- WALLA, C., 2004B: BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG DER BIOGASPRODUKTION. 10. ALPENLÄNDISCHES EXPERTENFORUM, 18.–19. MÄRZ 2004 IN DER BUNDESANSTALT FÜR ALPENLÄNDISCHE LANDWIRTSCHAFT GUMPENSTEIN, IRDNING.
- WALLA, C., 2005: MÜNDLICHE MITTEILUNG AM 30. JUNI 2005
- WALLA, C. UND SCHNEEBERGER, W., 2005A: ÖKONOMISCHE ANALYSEN ZUM BETRIEBZWEIG ENERGIEPFLANZENPRODUKTION FÜR BIOGASANLAGEN. BEITRAG PRÄSENTIERT BEI DER MITTEL-EUROPÄISCHEN BIOMASSEKONFERENZ, 26. – 29. JÄNNER 2005 IN GRAZ.
- WALLA, C. UND SCHNEEBERGER, W., 2005B: ENERGIEPFLANZENPRODUKTION IN BIOLOGISCHEN MARKTFRUCHTBETRIEBEN. IN HEß, J UND RAHMANN, G, (HRSG.): ENDE DER NICHE, BEITRÄGE ZUR 8. WISSENSCHAFTSTAGUNG ÖKOLOGISCHER LANDBAU. 1. – 3. MÄRZ. 2005 IN KASSEL. 619 – 622.
- WALLA, C. UND SCHNEEBERGER, W., 2005C: ENERGIEPFLANZENPRODUKTION IN VIEHLOSEN BIOBETRIEBEN. BERICHTE Ü. LANDWIRTSCHAFT 84/1
- WALLA, C. (2006): WIRTSCHAFTLICHKEIT VON BIOGASANLAGEN. DISSERTATION ZUR ERLANGUNG DES DOKTORGRADES AN DER UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN.

- WEILAND, P., 2003A: NOTWENDIGKEIT DER BIOGASAUFBEREITUNG, ANSPRÜCHE EINZELNER NUTZUNGSROUTEN UND STAND DER TECHNIK. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- WEILAND, P. (1998) COFERMENTATION OF BIOMASS-TECHNICAL, ORGANIZING AND LEGAL POSSIBILITIES FOR ENERGY PRODUKTION. IN BIOMASS FOR ENERGY AND INDUSTRY, C.A.R.E.N., PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE WÜRZBURG, GERMANY, 8–11 JUNE 1998, S. 698–701
- WEILAND, P. (2000): STAND UND PERSPEKTIVEN DER BIOGASNUTZUNG UND -ERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND. IN ENERGETISCHE NUTZUNG VON BIOGAS: STAND DER TECHNIK UND OPTIMIERUNGSPOTENTIAL, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, BAND 15, WEIMAR 26./27. OKTOBER 2000, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- WEILAND, P. (2001): GRUNDLAGEN DER METHANGÄRUNG – BIOLOGIE DER SUBSTRATE. IN: BIOGAS ALS REGENERATIVE ENERGIE – STAND UND PERSPEKTIVEN. TAGUNG HANOVER, 19./20. JUNI 2001, VDI-GESELLSCHAFT ENERGIETECHNIK, DÜSSELDORF, VDI-BERICHTE NR. 1620. ISBN 3-18-091620-6, S. 19–33
- WEILAND, P., 2003A: NOTWENDIGKEIT DER BIOGASAUFBEREITUNG, ANSPRÜCHE EINZELNER NUTZUNGSROUTEN UND STAND DER TECHNIK. IN: WORKSHOP „AUFBEREITUNG VON BIOGAS“, 17./18. JUNI 2003, GÜLZOWER FACHGESPRÄCHE, HRSG. FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V., GÜLZOW
- WELLINGER, A. (1984) BIOGAS – HANDBUCH, GRUNDLAGEN – PLANUNG – BETRIEB LANDWIRTSCHAFTLICHER ANLAGEN, VERLAG WIRZ AG, AARAU, ISBN 3-85983-028-7
- WELLINGER, A. (2000) STROM AUS GRAS ? KEIN PROBLEM! IN: BLICK INS LAND 7/2000, S. 25
- WELLINGER, A., 2001: NEUE ENTWICKLUNGEN DER BIOGASAUFBEREITUNG. IN: BIOGAS – BRENNSTOFFZELLENSYSTEME. SYMPOSIUM ÜBER DEN STAND DER ENTWICKLUNG UND DIE PERSPEKTIVEN. PROFACOR PRODUKTIONSFORSCHUNGS GMBH (ED.) 15. MAI 2001, STEYR
- WENDT, H. & PLZAK, V. (1992) BRENNSTOFFZELLEN – EINE EINFÜHRUNG. VDI-BERICHTE NR. 912, VDI-VERLAG GMBH, DÜSSELDORF
- WIKIPEDIA, 2005: HOMEPAGE: [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/WIKI](http://de.wikipedia.org/wiki)
- WILLENBRINK, B., 2002: EINSATZ VON MICRO-GASTURBINEN ZUR BIOGASNUTZUNG. IN: ERNEUERBARE ENERGIE IN DER LAND(WIRT)SCHAFT 2002/2003 – BAND 5. VERLANG FÜR LAND(WIRT)SCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN, MICHAEL C. MEDENBACH, ZEVEN, ISBN 3-935781-04-0
- ZAMG, 2001: HOMEPAGE: [HTTP://WWW.ZAMG.AC.AT/KLIMA_FRM.HTM](http://www.zamg.ac.at/klima_frm.htm)
- ZAUNER E.; KÜNTZEL U. (1986) METHANE PRODUCTION FROM ENSILED PLANT MATERIAL. BIOMASS 10, 207–223.
- ZATARI, T.M., BOZINIS, N.A., ALEXIOU, I.E. (2001): STEADY-STATE MODELLING OF THE VERTICAL SEQUENTIAL REACTOR TREATING PFMSW, PROCEEDINGS OF 9TH WORLD CONGRESS ANAEROBIC DIGESTION, ANTWERPEN – BELGIUM, SEPTEMBER 2–6
- ZHANG R.; ZHANG Z. (1999) BIOGASIFICATION OF RICE STRAW WITH AN ANAEROBIC-PHASED SOLIDS DIGESTER SYSTEM. BIORESOURCE TECHNOLOGY 68, 235–245
- ZOLLNER, D. 2000: AUFBAU EINES GIS-GESTÜTZTEN INSTRUMENTES FÜR DEN ÖKOLOGISCHEN LANDBAU IN ÖSTERREICH. ANWENDUNGSBEISPIEL: ENTWICKLUNG EINES LEITBETRIEBNETZES MIT VERTIEFENDER ERLÄUTERUNG DER BETRIEBSFORM MARKTFRUCHT. DIPLOMARBEIT AM INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHEN LANDBAU, AN DER UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR, WIEN. 110 S.
- ZWATZ, E., 2005: SUDANGRAS – EINE ALTERNATIVE ZU MAIS? DER FORTSCHRITTLICHE LANDWIRT, AUSGABE 7 VOM 1. APRIL 2005

7.2 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1. Einflüsse auf die Qualität der Pflanzenbiomasse, den Gärrohstoff und das Gärgut bei Nutzung von Energiepflanzen in der Biogaserzeugungskette..... | 14 |
| Abbildung 2: Standorte des Energiepflanzenanbaues zur Optimierung der Gärrohstoffqualität zur Methanerzeugung. | 32 |
| Abbildung 3. Grob- (a) und Feinzerkleinerung (b) der Energiepflanzen | 33 |
| Abbildung 4. Zerkleinerungsgrad von Silomaissilage von Pflanzen verschiedener Vegetationsstadien | 33 |
| Abbildung 5. Eudiometer-Messapparatur nach DIN 38414..... | 35 |
| Abbildung 6. Eudiometer-Messapparatur nach DIN 38414..... | 35 |
| Abbildung 7. Einsetzen des Probenmaterials und des Impfsubstrates in die Gärbehälter im anaeroben Schrank..... | 36 |
| Abbildung 8. Schema des Energiestoffwechsels | 41 |
| Abbildung 9. Weizenbestand der Sorte Capo zu allen fünf Ernteterminen (Standort: Loimersdorf, Niederösterreich) | 66 |
| Abbildung 10. Roggenbestand der Sorte Beskud zum ersten, dritten und fünften Erntetermin (Standort: Schörfling am Attersee, Oberösterreich)..... | 66 |
| Abbildung 11. Triticalebestand der Sorte Talentro zum ersten, dritten und fünften Erntetermin (Standort: Lenzing, Oberösterreich)..... | 67 |
| Abbildung 12. Entwicklung des Biomasseertrages der verschiedenen Getreidesorten | 70 |
| Abbildung 13. Spezifischer Methanertrag verschiedener Getreidesorten | 73 |
| Abbildung 14. Methanhektarertrag verschiedener Getreidesorten | 74 |
| Abbildung 15. Sonnenblumenbestand der Sorte PR 63A82 zu den ersten fünf Ernteterminen (Standort: Groß-Enzersdorf, Niederösterreich)..... | 77 |
| Abbildung 16. Entwicklung des Biomasseertrages der Sonnenblumensorten..... | 79 |
| Abbildung 17: Biomasseerträge von Sonnenblumensorten im Vergleich (132. Wachstumstag) | 80 |
| Abbildung 18. Spezifischer Methanertrag der Sonnenblumensorten..... | 83 |
| Abbildung 19. Methanhektarertrag der Sonnenblumensorten | 84 |
| Abbildung 20: Biomasseerträge der unterschiedlich genutzten Wiesengrasbestände | 89 |
| Abbildung 21: Spezifischer Methanertrag der Wiesengrasbestände im Verlauf der einzelnen Aufwüchse | 91 |
| Abbildung 22: Methanhektarerträge der Wiesengrasbestände in den einzelnen Aufwüchsen .. | 92 |
| Abbildung 23. Maisbestand im Vegetationsverlauf zu verschiedenen Erntezeitpunkten | 94 |
| Abbildung 24: Entwicklung des Biomasseertrages der verschiedenen Maissorten | 96 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 25: Spezifischer Methanertrag der verschiedenen Maissorten | 98 |
| Abbildung 26: Methanhektarertrag der untersuchten Maissorten zum 3. Erntetermin | 99 |
| Abbildung 27. Einfluss verschiedener Vorbehandlungsmaßnahmen auf die spezifische Methanausbeute | 116 |
| Abbildung 28. Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas von Gärgutmischungen im Verlauf der Vergärung | 124 |
| Abbildung 29. Ammoniakgehalt im Biogas von Gärgutmischungen im Verlauf der Vergärung | 125 |
| Abbildung 30: Methanhektarertrag von Mais in Abhängigkeit zum Trockenmassegehalt der Gesamtpflanze | 130 |
| Abbildung 31. Erforderliche Aufbereitungsschritte für die einzelnen Nutzungswege (verändert nach Weiland 2003a) | 142 |

7.3 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1. Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen nach Literaturangaben..... | 19 |
| Tabelle 2. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung der Methanenergiewerte von Klee gras und Mais | 26 |
| Tabelle 3. Projektziele und Darstellung der Arbeitsschwerpunkte mit Beschreibung der Frage- und Problemstellungen..... | 28 |
| Tabelle 4: Klimadaten der Untersuchungsregionen | 44 |
| Tabelle 5: Standorträume und deren Betriebstypen | 45 |
| Tabelle 6: Methanhektarerträge im biologischen Landbau je Kulturart und Ertragsniveau..... | 46 |
| Tabelle 7: Methanhektarerträge im konventionellen Landbau je Kulturart und Ertragsniveau... | 47 |
| Tabelle 8: Konventionelle und biologische Betriebstypen in Untersuchungsregion I: Weinviertel | 49 |
| Tabelle 9: Ausgewählte konventionelle Betriebstypen im Weinviertel | 49 |
| Tabelle 10: Konventionelle und biologische Betriebstypen über die gesamte Region Mostviertel-Eisenwurzen..... | 50 |
| Tabelle 11: Ausgewählte biologische Betriebsmodelle in der Region Mostviertel-Eisenwurzen (II. und III.) | 51 |
| Tabelle 12: Ausgewählte konventionelle Betriebsmodelle in der Region Mostviertel-Eisenwurzen (II. und III.) | 51 |
| Tabelle 13: Vorgaben für Kulturanteile biologischer Fruchtfolgen | 52 |
| Tabelle 14: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe im Weinviertel | 53 |
| Tabelle 15: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe im Weinviertel | 54 |
| Tabelle 16: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 55 |
| Tabelle 17: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 56 |
| Tabelle 18: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge biologischer Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD..... | 57 |
| Tabelle 19: Mittlerer Kulturartenanteil und Deckungsbeiträge konventioneller Betriebe in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD..... | 58 |
| Tabelle 20: Mittlere Trockenmasse- und Stickstoffgehalte wichtiger Kulturpflanzen im biologischen und konventionellen Landbau | 61 |
| Tabelle 21: Höchstwerte für die N-Düngung im Ackerbau bei mittlerer Ertragserwartung (laut ÖPUL-Richtlinien 2000) | 62 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 22: N-Gehalte in Frisch- und Biogasgülle unterteilt in Schweine- und Rindergülle | 62 |
| Tabelle 23. Übersicht über wichtige Daten zu den Getreidestandorten und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen..... | 64 |
| Tabelle 24. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Getreidebestände zum Erntezeitpunkt1 | 65 |
| Tabelle 25. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der verschiedenen Getreidearten und -sorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände | 68 |
| Tabelle 26. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH ₄ -Ausbeute der Weizensorten Capo und Levendis und der Triticalesorten Talentro und Tremplin zu je 5 Ernteterminen | 71 |
| Tabelle 27. Übersicht über wichtige Daten zum Sonnenblumenstandort und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen | 75 |
| Tabelle 28. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Sonnenblumenbestände zum Erntezeitpunkt1 | 76 |
| Tabelle 29. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der Sonnenblumensorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände | 77 |
| Tabelle 30. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH ₄ -Ausbeute der Sonnenblumensorten PR 63A82 und PR 64H41 im Vegetationsverlauf | 82 |
| Tabelle 31. Übersicht über wichtige Daten zu den Wiesengrasstandorten und die Kulturführung im Feldversuch | 85 |
| Tabelle 32. Variantenbezeichnung, Bewirtschaftungsintensität, Aufwuchs, Schnitzeitpunkt, Vegetationsstadium und Wuchshöhe der Wiesengrasbestände am extensiven Standort Buchau–Admont | 86 |
| Tabelle 33. Variantenbezeichnung, Bewirtschaftungsintensität, Aufwuchs, Schnitzeitpunkt, Vegetationsstadium und Wuchshöhe der Wiesengrasbestände am intensiver genutzten Standort Gumpenstein-Irdning..... | 87 |
| Tabelle 34. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der verschiedenen Wiesengrasaufwüchse am extensiven Standort Buchau-Admont | 87 |
| Tabelle 35. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt, Rohaschegehalt und Trockenmasseertrag der verschiedenen Wiesengrasaufwüchse am intensiveren Standort Gumpenstein-Irdning..... | 88 |
| Tabelle 36. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH ₄ -Ausbeute der extensiv genutzten Wiesen bei Verwendung von frischen und silierten Proben (Standort Buchau-Admont)..... | 90 |
| Tabelle 37. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH ₄ -Ausbeute der intensiver genutzten Wiesen bei Verwendung von frischen und silierten Proben (Standort Gumpenstein-Irdning)..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| Tabelle 38. Übersicht über wichtige Daten zum Maisstandort und der Kulturführung in den Feldsortenversuchen | 93 |
| Tabelle 39. Erntezeitpunkte, Vegetationsentwicklungen und Alter der Maissorten zum Erntezeitpunkt | 94 |
| Tabelle 40. Frischmasseertrag, Trockenmassegehalt und Trockenmasseertrag der Maissorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. dem Stadium der Vegetationsentwicklung der Bestände | 95 |
| Tabelle 41. Inhaltsstoffe, Energiegehalte und CH ₄ -Ausbeute der Maissorten zum 3. Erntetermin | 97 |
| Tabelle 42: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit Hack- und Ölfrüchten | 100 |
| Tabelle 43: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel ohne Hack- und Ölfrüchte | 101 |
| Tabelle 44: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit hohem Hackfruchtanteil | 102 |
| Tabelle 45: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Weinviertel mit hohem Ölsaatenanteil | 102 |
| Tabelle 46: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Marktfruchtbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 103 |
| Tabelle 47: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Schweinehaltung (Zuchtsauen) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 104 |
| Tabelle 48: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 105 |
| Tabelle 49: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Marktfruchtbetrieb in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 105 |
| Tabelle 50: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Schweinehaltung (Mastschweine) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 106 |
| Tabelle 51: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen NORD | 106 |
| Tabelle 52: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen biologischen Betrieb mit Rinderhaltung (Milch- Mutterkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | 107 |
| Tabelle 53: Regionstypische Modellfruchtfolge für einen konventionellen Betrieb mit Rinderhaltung (Milchkuh) in der Region Mostviertel-Eisenwurzen SÜD | 108 |
| Tabelle 54: Methanhektarerträge (Nm ³ (ha a) ⁻¹) biologischer Fruchtfolgen | 109 |
| Tabelle 55: Methanhektarerträge (Nm ³ (ha a) ⁻¹) konventioneller Fruchtfolgen | 109 |
| Tabelle 56: Gas- und Methanhektarertrag Grünroggen – Zweitfrucht Mais | 110 |
| Tabelle 57: Methanhektarerträge (Nm ³ (ha a) ⁻¹) der Rinder- bzw. Schweinegülle aus biologischen und konventionellen Betrieben | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 58: Stickstoffüberschüsse biologischer Fruchtfolgesysteme bezogen auf die Gesamtbetriebsfläche in kg N (ha a) ⁻¹ | 112 |
| Tabelle 59: Stickstoffüberschüsse konventioneller Fruchtfolgesysteme bezogen auf die Gesamtbetriebsfläche in kg N (ha a) ⁻¹ | 113 |
| Tabelle 60. Spezifische Biogas- und Methanausbeute unterschiedlich behandelter Energiepflanzen | 115 |
| Tabelle 61. Substratspezifische optimale hydraulische Verweilzeit unterschiedlich behandelter Energiepflanzen | 118 |
| Tabelle 62. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Mais anhand der Roh Nährstoffe | 119 |
| Tabelle 63. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Getreide anhand der Roh Nährstoffe | 120 |
| Tabelle 64. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Sonnenblumen anhand der Roh Nährstoffe | 120 |
| Tabelle 65. Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Wiesengras anhand der Roh Nährstoffe | 121 |
| Tabelle 66. Inhaltsstoffzusammensetzung der eingesetzten Gärgüter | 121 |
| Tabelle 67. Zusammensetzung der Mischungen aus Mais- und Kleegrassilage, sowie Einwaagemengen im Stoffwechselfersuch und oTS-Zusammensetzung der Mischungen | 122 |
| Tabelle 68. Spezifischer Methanertrag von Gärgutmischungen | 123 |
| Tabelle 69. Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im Biogas von Gärgutmischungen | 124 |
| Tabelle 70. Spezifischer Methanertrag von Energiepflanzen mit und ohne Zugabe eines Biokatalysators | 125 |
| Tabelle 71. Methan-, Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalt im Biogas von Energiepflanzen mit und ohne Zugabe eines Biokatalysators | 126 |
| Tabelle 72. Biomasseerträge der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich | 127 |
| Tabelle 73. Biogas- und Methanbildungsrate sowie Methangehalt verdaulicher Inhaltsstoffe von Futtermitteln (nach Karpenstein-Machan 2005) | 131 |
| Tabelle 74. Spezifische Methanausbeute der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich | 131 |
| Tabelle 75. Methanhektarerträge der verschiedenen untersuchten Energiepflanzen im Vergleich | 132 |
| Tabelle 76. Energiekennzahlen der Biogaserzeugung in spezialisierten und integrierten Erzeugungssystemen | 134 |
| Tabelle 77. Volkswirtschaftliche Kennzahlen in spezialisierten und integrierten Biogaserzeugungssystemen | 135 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 78 Beschäftigungswirkung spezialisierter und integrierter Biogaserzeugungssysteme | 136 |
| Tabelle 79: Nährstoffabfuhr (Stickstoff, Phosphor und Kalium) verschiedener Energiepflanzen in Abhängigkeit vom Ertragsniveau (nach KARPENSTEIN-MACHAN, 2005) | 140 |
| Tabelle 80. Anforderungen an das Biogas bei der Nutzung in Mikrogasturbinen (nach Krautkremer 2003a) | 143 |
| Tabelle 81. Qualitätsanforderungen für Biogasnetzeinspeisung in Österreich (nach Hornbachner et al. 2005) ¹ | 143 |
| Tabelle 82. Qualitätsanforderungen an Greengas im Vergleich zu Rohbiogas (nach Schulte-Schulze Berndt 2003) | 144 |
| Tabelle 83. Verfahren zur Entwässerung von Biogas (nach Weiland 2003a) | 146 |
| Tabelle 84. Verfahren zur Entschwefelung von Biogas (nach Weiland 2003a) | 147 |
| Tabelle 85. Vor- und Nachteile der biologischen Entschwefelung im Fermenter (nach Scholwin et al. 2004a, Helms 2002) | 148 |
| Tabelle 86. Vor- und Nachteile der biologischen Entschwefelung außerhalb des Fermenters (nach Scholwin et al. 2004a, Helms 2002) | 148 |
| Tabelle 87. Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung im Fermenter (nach Scholwin et al. 2004a) | 149 |
| Tabelle 88. Vor- und Nachteile der chemischen Entschwefelung außerhalb des Fermenters (nach Scholwin et al. 2004a) | 151 |
| Tabelle 89. Charakteristische Stoffeigenschaften von Adsorptionsmitteln (Schultes 1996) | 151 |
| Tabelle 90. Vor- und Nachteile der Entschwefelung durch Adsorption (nach Krill 1993) | 152 |
| Tabelle 91. Verfahren zur Methananreicherung aus Biogas (nach Schulte-Schulze Berndt 2003 und Weiland 2003a) | 153 |
| Tabelle 92. NO _x -Grenzwerte entsprechend der TA-Luft für Gas- und Zündstrahlmotoren (nach Simon & Schwanhäußler 2004) | 158 |
| Tabelle 93. Vor- und Nachteile von Gas-Ottomotoren mit Biogasbetrieb (nach Scholwin et al. 2004a, Mitterleitner 2002) | 158 |
| Tabelle 94. Vor- und Nachteile von Zündstrahl-Motoren mit Biogasbetrieb (nach Scholwin et al. 2004a, Mitterleitner 2002, Simon & Schwanhäußler 2004) | 159 |
| Tabelle 95. Vor- und Nachteile von Mikrogasturbinen mit Biogasbetrieb (Dielmann 2001, Arlt 2000, Willenbrink 2002) | 160 |

7.4 Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Beschreibung |
|-----------|--------------------------------|
| °C | Grad Celsius |
| € | Euro |
| λ | Luftkraftstoffverhältnis |
| η | Wirkungsgrad |
| ADF | Acid detergent fiber |
| ADL | Acid detergent lignin |
| AF | Ackerfläche |
| Al_2O_3 | Aluminiumoxid |
| BE | Bruttoenergie |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| C | Kohlenstoff |
| C_t | Kohlenstoff total |
| CCM | Corn-Cob-Mix |
| CH_4 | Methan |
| CO | Kohlenmonoxid |
| CO_2 | Kohlendioxid |
| d | Tag |
| DB | Deckungsbeitrag |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| dt | Dezitonne |
| F&E | Forschung und Entwicklung |
| Fe_2S_3 | Eisensulfid |
| FF | Fruchtfolge |
| FFS | Flüchtige Fettsäuren |
| FM | Frischmasse |
| g | Gramm |
| GWh | Gigawattstunde |
| h | Stunde |
| H | Wasserstoff |
| H_2S | Schwefelwasserstoff |
| ha | Hektar |
| HRT | hydraulische Verweilzeit |
| Hz | Hertz |
| K | Kelvin |
| Kfz | Kraftfahrzeug |
| kg | Kilogramm |
| K_2O | Kaliumoxid |
| kW | Kilowatt |
| kW_{el} | Kilowatt elektrisch |

| | |
|-------------------------------|---|
| kWh | Kilowattstunde |
| kWh _{el} | Kilowattstunde elektrisch |
| kWh _{therm} | Kilowattstunde thermisch |
| l | Liter |
| J | Joule |
| LN | Landwirtschaftliche Nutzfläche |
| m | Meter |
| mm | Millimeter |
| m ² | Quadratmeter |
| m ³ | Kubikmeter |
| mbar | Millibar |
| MEW | Methanenergiewert |
| MEWM | Methanenergiewertmodell |
| mg | Milligramm |
| min | Minute |
| MJ | Megajoule |
| MW | Megawatt |
| n | Anzahl Beobachtungen |
| N | Stickstoff |
| N _t | Stickstoff total |
| N ₂ | Stickstoffgas |
| NDF | Neutral detergent fiber |
| NDIR | Non-dispersive infrared |
| NH ₃ | Ammoniak |
| NH ₄ | Ammonium |
| NI | Normliter |
| Nm ³ | Normkubikmeter |
| Nml | Normmilliliter |
| NO _x | Stickoxide |
| NUTS | Nomenclature des unités territoriales statistiques |
| O | Sauerstoff |
| O ₂ | Sauerstoffgas |
| ÖKL | Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung |
| oTS | organische Trockensubstanz |
| p ₀ | Luftdruck Normbedingungen |
| Pa | Pascal |
| P ₂ O ₅ | Phosphorpentoxid (Phosphat) |
| ppm | Parts per Million |
| R ² | Bestimmtheitsmaß |
| S | Schwefel |
| SiO ₂ | Siliciumdioxid |
| SO ₃ ²⁻ | Schwefeltrioxid |
| SO ₄ ²⁻ | Schwefeldioxid |
| STABW | Standardabweichung |

| | |
|----------------|-----------------------------|
| t | Tonne |
| t ₀ | Temperatur Normbedingungen |
| TM | Trockenmasse |
| U | Umdrehungen |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| Vol.% | Volumenprozent |
| XA | Rohasche |
| XF | Rohfaser |
| XL | Rohfett |
| XP | Rohprotein |
| XX | N-freie Extraktstoffe |

8 Anhang

Tabelle 96. Nutzung, Aufwuchs, Erntedatum und Erntestadium, Zusammensetzung der Wiesengrasgemischungen und Frischmasse und Trockenmasseertrag in [t TM/ha] der Getreidearten und -sorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. dem Stadium der Vegetationsentwicklung der extensiven Bestände

| Variante | Nutzungen / Jahr | Aufwuchs | Datum | Entwicklungsstadium | Wuchshöhe [cm] | Gräser [%] | Leguminosen [%] | Kräuter [%] | Grünmasse [dt/ha] | TM Ertrag [g/kg] | TM Ertrag [dt/ha] | Methanhektarertrag [Nm ³ /ha] |
|------------------------|------------------|----------|------------|---------------------|----------------|------------|-----------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------|--|
| Buchau – Admont | | | | | | | | | | | | |
| Ex-1 | 1 | 1 | 30.08.2004 | 4 | 69 | 49 | 2 | 51 | 192 | 221 | 42 | 649 |
| | | | | | | | | | Summe | | 42 | 649 |
| Ex-2-1A | 2 | 1 | 05.07.2004 | 3 | 78 | 45 | 5 | 50 | 228 | 168 | 38 | 655 |
| Ex-2-2A | 2 | 2 | 11.10.2004 | 2 | 47 | 43 | 3 | 54 | 156,9 | 160 | 25 | 323 |
| | | | | | | | | | Summe | | 63 | 978 |
| Ex-3-1A | 3 | 1 | 09.06.2004 | 2 | 48 | 39 | 9 | 52 | 161 | 165 | 26 | 583 |
| Ex-3-2A | 3 | 2 | 29.07.2004 | 2-3 | 28 | 37 | 11 | 52 | 117 | 151 | 18 | 294 |
| Ex-3-3A | 3 | 3 | 11.10.2004 | 2 | 22 | 35 | 9 | 56 | 105 | 144 | 15 | 231 |
| | | | | | | | | | Summe | | 59 | 1108 |

Tabelle 97. Nutzung, Aufwuchs, Erntedatum und Erntestadium, Zusammensetzung der Wiesengrasgemischungen und Frischmasse und Trockenmasseertrag in [t TM/ha] der Getreidearten und –sorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bzw. dem Stadium der Vegetationsentwicklung der intensiven Bestände

| Variante | Nutzungen / Jahr | Aufwuchs | Datum | Entwicklungsstadium | Wuchshöhe [cm] | Gräser [%] | Leguminosen [%] | Kräuter [%] | Grünmasse [dt/ha] | TM [g/kg] | TM Ertrag [dt/ha] | Methanhektarertrag [Nm ³ /ha] |
|------------------------------|------------------|----------|------------|---------------------|----------------|------------|-----------------|-------------|-------------------|-----------|-------------------|--|
| Gumpenstein – Irdring | | | | | | | | | | | | |
| Int-4-1A | 4 | 1 | 18.05.2004 | 1-2 | 46 | 59 | 40 | 1 | 157 | 159 | 25 | 643 |
| Int-4-2A | 4 | 2 | 06.07.2004 | 2 | 62 | 64 | 35 | 1 | 237 | 156 | 37 | 1447 |
| Int-4-3A | 4 | 3 | 09.09.2004 | 2 | 68 | 93 | 6 | 1 | 222 | 171 | 38 | 1208 |
| Int-4-4A | 4 | 4 | 30.09.2004 | 1 | 19 | 86 | 12 | 2 | 19 | 121 | 2 | 81 |
| | | | | | | | | | Summe | | 102 | 3378 |
| Int-3-f-1A | 3 | 1 | 01.06.2004 | 2 | 44 | 48 | 51 | 1 | 237 | 152 | 36 | 1134 |
| Int-3-f-2A | 3 | 2 | 22.07.2004 | 2-3 | 64 | 59 | 40 | 1 | 208 | 170 | 35 | 963 |
| Int-3-f-3A | 3 | 3 | 27.09.2004 | 1-2 | 61 | 86 | 12 | 2 | 227 | 143 | 33 | 618 |
| | | | | | | | | | Summe | | 104 | 2714 |
| Int-3-s-1A | 3 | 1 | 15.06.2004 | 2-3 | 52 | 55 | 44 | | 250 | 207 | 52 | 1872 |
| Int-3-s-2A | 3 | 2 | 03.08.2004 | 3 | 59 | 77 | 22 | | 185 | 165 | 31 | 586 |
| Int-3-s-3A | 3 | 3 | 10.10.2004 | 1-2 | 62 | 88 | 10 | | 215 | 145 | 31 | 756 |
| | | | | | | | | | Summe | | 113 | 3213 |